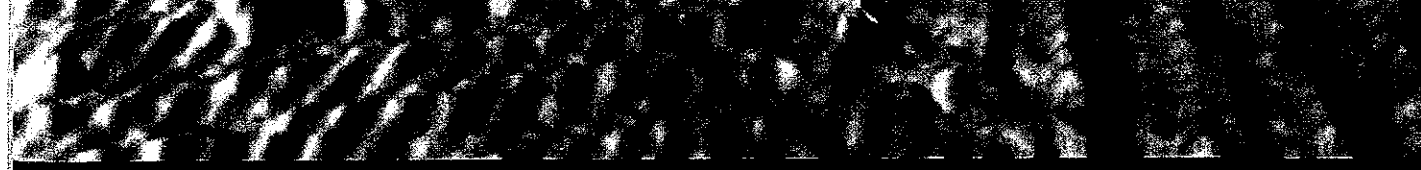


Ciencia e ingeniería de materiales

Sexta edición



Ciencia e ingeniería de materiales

Sexta edición

Donald R. Askeland

University of Missouri-Rolla, emérito

Pradeep P. Fulay

University of Pittsburgh

Wendelin J. Wright

Bucknell University

Traducción:

Ing. Jorge Hernández Lanto

Ing. Jorge Humberto Romo Muñoz

Traductores profesionales

Revisión técnica:

Ing. Javier León Cárdenas

Escuela Superior de Química e Industrias Extractivas

Instituto Politécnico Nacional



Australia • Brasil • Corea • España • Estados Unidos • Japón • México • Reino Unido • Singapur

**Ciencia e ingeniería de materiales,
Sexta edición.**

Donald R. Askeland, Pradeep P. Fulay
y Wendelin J. Wright

**Presidente de Cengage Learning
Latinoamérica:**

Fernando Valenzuela Migoya

**Director de producto y desarrollo
Latinoamérica:**

Daniel Oti Yvonett

**Director editorial y de producción
Latinoamérica:**

Raúl D. Zendejas Espejel

Editor de desarrollo:

Sergio R. Cervantes González

Coordinadora de producción editorial:

Abril Vega Orozco

Editor de producción:

Omar A. Ramírez Rosas

Coordinador de manufactura:

Rafael Pérez González

Diseño de portada:

Mariana Sierra Enríquez

Imagen de portada:

© Sieu Ha/Antoine Kahn/
Princeton University

Composición tipográfica:

Servicios Editoriales 6Ns, S.A. de C.V.

© D.R. 2012 por Cengage Learning Editores, S.A.
de C.V., una Compañía de Cengage Learning, Inc.
Corporativo Santa Fe
Av. Santa Fe núm. 505, piso 12
Col. Cruz Manca, Santa Fe
C.P. 05349, México, D.F.
Cengage Learning™ es una marca registrada
usada bajo permiso.

DERECHOS RESERVADOS. Ninguna parte de
este trabajo amparado por la Ley Federal del
Derecho de Autor, podrá ser reproducido,
transmitido, almacenado o utilizado en
cualquier forma o por cualquier medio, ya sea
gráfico, electrónico o mecánico, incluyendo,
pero sin limitarse a lo siguiente: fotocopiado,
reproducción, escaneo, digitalización,
grabación en audio, distribución en Internet,
distribución en redes de información o
almacenamiento y recopilación en sistemas
de información a excepción de lo permitido
en el Capítulo III, Artículo 27 de la Ley Federal
del Derecho de Autor, sin el consentimiento
por escrito de la Editorial.

Traducido del libro *The Science and Engineering
of Materials, Sixth Edition.*

Askeland, Donald R., Pradeep P. Fulay,
and Wendelin J. Wright
Publicado en inglés por Cengage Learning
© 2011.

ISBN 13: 978-0-495-29602-7

ISBN 10: 0-495-29602-3

Datos para catalogación bibliográfica:

Askeland, Donald R., Pradeep P. Fulay
y Wendelin J. Wright
Ciencia e ingeniería de materiales, Sexta edición.
ISBN: 978-607-481-620-4

Visite nuestro sitio web en:

<http://latinoamerica.cengage.com>

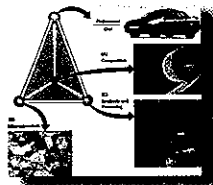
Este libro se terminó de imprimir en el mes de
Mayo del 2013, en Impresos Vacha, S.A. de C.V.
Juan Hernández y Dávalos Núm. 47, Col. Algarín,
México, D.F., CP 06880, Del. Cuauhtémoc.

Para Mary Sue y Tyler
--Donald R. Askeland

Para Jyotsna, Aarohee y Suyash
--Pradeep P. Fulay

Para John, al iniciar el siguiente capítulo maravilloso en nuestra vida juntos
--Wendelin J. Wright

Contenido



Capítulo 1 Introducción a la ciencia e ingeniería de materiales 3

- 1-1 ¿Qué es la ciencia e ingeniería de materiales? 4
- 1-2 Clasificación de los materiales 7
- 1-3 Clasificación funcional de los materiales 11
- 1-4 Clasificación de los materiales con base en la estructura 13
- 1-5 Efectos ambientales y diversos 13
- 1-6 Diseño y selección de materiales 16

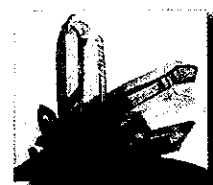
Resumen 17 | Glosario 18 | Problemas 19



Capítulo 2 Estructura atómica 23

- 2-1 Estructura de materiales: relevancia tecnológica 24
- 2-2 Estructura del átomo 27
- 2-3 Estructura electrónica del átomo 29
- 2-4 Tabla periódica 32
- 2-5 Enlace atómico 34
- 2-6 Energía de unión y espaciado interatómico 41
- 2-7 Las muchas formas del carbono: relaciones entre los arreglos de los átomos y las propiedades materiales 44

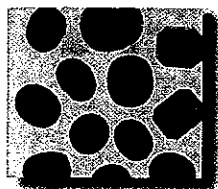
Resumen 48 | Glosario 50 | Problemas 52



Capítulo 3 Arreglos atómicos e iónicos 55

- 3-1 Orden de corto alcance frente a orden de largo alcance 56
- 3-2 Materiales amorfos 58
- 3-3 Red, base, celdas unitarias y estructuras cristalinas 60
- 3-4 Transformaciones alotrópicas y polimórficas 72
- 3-5 Puntos, direcciones y planos en la celda unitaria 73
- 3-6 Sitios intersticiales 84
- 3-7 Estructuras cristalinas de los materiales iónicos 86
- 3-8 Estructuras covalentes 92
- 3-9 Técnicas de difracción para el análisis de estructuras cristalinas 96

Resumen 100 | Glosario 102 | Problemas 104



Capítulo 4 Imperfecciones en los arreglos atómicos e iónicos 113

- 4-1 Defectos puntuales 114
- 4-2 Otros defectos puntuales 120
- 4-3 Dislocaciones 122
- 4-4 Importancia de las dislocaciones 130
- 4-5 Ley de Schmid 131
- 4-6 Influencia de la estructura cristalina 134
- 4-7 Defectos superficiales 135
- 4-8 Importancia de los defectos 141

Resumen 144 | Glosario 145 | Problemas 147



Capítulo 5 Movimientos de los átomos e iones en los materiales 155

- 5-1 Aplicaciones de la difusión 156
- 5-2 Estabilidad de los átomos y iones 159
- 5-3 Mecanismos para la difusión 161
- 5-4 Energía de activación para la difusión 163
- 5-5 Velocidad de difusión [primera ley de Fick] 164
- 5-6 Factores que afectan la difusión 168
- 5-7 Permeabilidad de los polímeros 176
- 5-8 Perfil de la composición [segunda ley de Fick] 177
- 5-9 Difusión y procesamiento de materiales 182

Resumen 187 | Glosario 188 | Problemas 190



Capítulo 6 Propiedades mecánicas: primera parte 197

- 6-1 Importancia tecnológica 198
- 6-2 Terminología de las propiedades mecánicas 199
- 6-3 Prueba de tensión: uso del diagrama esfuerzo-deformación unitaria 204
- 6-4 Propiedades obtenidas a partir de la prueba de tensión 208
- 6-5 Esfuerzo verdadero y deformación verdadera 216
- 6-6 Prueba de flexión para materiales quebradizos 218
- 6-7 Dureza de los materiales 221
- 6-8 Nanoindentación 223
- 6-9 Efectos de la rapidez de deformación y comportamiento al impacto 227
- 6-10 Propiedades obtenidas a partir de la prueba de impacto 228
- 6-11 Vidrios metálicos voluminosos y su comportamiento mecánico 231
- 6-12 Comportamiento mecánico a escalas de longitud pequeñas 233

Resumen 235 | Glosario 236 | Problemas 239



Capítulo 7 Propiedades mecánicas: segunda parte 247

- 7-1 Mecánica de la fractura 248
- 7-2 Importancia de la mecánica de la fractura 250
- 7-3 Características microestructurales de fractura en materiales metálicos 254
- 7-4 Características microestructurales de la fractura en cerámicas, vidrios y compuestos 258
- 7-5 Estadística de Weibull para el análisis de la resistencia a la falla 260
- 7-6 Fatiga 266
- 7-7 Resultados de la prueba de fatiga 268
- 7-8 Aplicación de la prueba de fatiga 270
- 7-9 Termofluencia, ruptura por esfuerzo y corrosión por esfuerzo 274
- 7-10 Evaluación del comportamiento de la termofluencia 276
- 7-11 Uso de la información de la fluencia lenta 278

Resumen 280 | Glosario 280 | Problemas 282



Capítulo 8 Endurecimiento por deformación y recocido 291

- 8-1 Relación del trabajo en frío con la curva esfuerzo-deformación 292
- 8-2 Mecanismos del endurecimiento por deformación 297
- 8-3 Propiedades en función del porcentaje de trabajo en frío 299
- 8-4 Microestructura, endurecimiento por textura y esfuerzos residuales 301
- 8-5 Características del trabajo en frío 306
- 8-6 Las tres etapas del recocido 308
- 8-7 Control del recocido 311
- 8-8 Recocido y procesamiento de materiales 313
- 8-9 Trabajo en caliente 315

Resumen 317 | Glosario 318 | Problemas 320



Capítulo 9 Principios de la solidificación 329

- 9-1 Importancia tecnológica 330
- 9-2 Formación de núcleos 330
- 9-3 Aplicaciones de la nucleación controlada 335
- 9-4 Mecanismos de crecimiento 336
- 9-5 Tiempo de solidificación y tamaño dendrítico 338
- 9-6 Curvas de enfriamiento 343
- 9-7 Estructura de la pieza colada 344
- 9-8 Defectos de la solidificación 346
- 9-9 Procesos de vaciado para la fabricación de componentes 351

- 9-10 Colada continua y fundición de lingotes 353
- 9-11 Solidificación direccional [SD], crecimiento de cristales sencillos y crecimiento epitaxial 357
- 9-12 Solidificación de polímeros y vidrios inorgánicos 359
- 9-13 Unión de materiales metálicos 360

Resumen 362 | Glosario 363 | Problemas 365



Capítulo 10 Soluciones sólidas y equilibrio de fases 375

- 10-1 Fases y diagrama de fases 376
- 10-2 Solubilidad y soluciones sólidas 380
- 10-3 Condiciones para la solubilidad sólida ilimitada 382
- 10-4 Endurecimiento por solución sólida 384
- 10-5 Diagramas de fases isomorfos 387
- 10-6 Relación entre las propiedades y el diagrama de fases 395
- 10-7 Solidificación de una aleación de solución sólida 397
- 10-8 Solidificación y segregación sin equilibrio 399

Resumen 403 | Glosario 404 | Problemas 405



Capítulo 11 Endurecimiento por dispersión y diagramas de fases eutécticos 413

- 11-1 Principios y ejemplos del endurecimiento por dispersión 414
- 11-2 Compuestos intermetálicos 414
- 11-3 Diagramas de fases que contienen reacciones de tres fases 417
- 11-4 Diagrama de fases eutéctico 420
- 11-5 Resistencia de las aleaciones eutécticas 430
- 11-6 Eutécticos y procesamiento de materiales 436
- 11-7 Solidificación sin equilibrio en el sistema eutéctico 438
- 11-8 Nanoalambres y el diagrama de fases eutéctico 438

Resumen 441 | Glosario 441 | Problemas 443



Capítulo 12 Endurecimiento por dispersión mediante transformaciones de fase y tratamiento térmico 451

- 12-1 Formación de núcleos y crecimiento en reacciones en estado sólido 452
- 12-2 Aleaciones endurecidas al exceder el límite de solubilidad 456
- 12-3 Endurecimiento por envejecimiento o por precipitación 458
- 12-4 Aplicaciones de aleaciones endurecidas por envejecimiento 459
- 12-5 Evolución microestructural en endurecimiento por envejecimiento o por precipitación 459
- 12-6 Efectos de la temperatura y tiempo de envejecimiento 462

- 12-7 Requisitos para endurecimiento por envejecimiento 464
- 12-8 Uso de aleaciones que pueden endurecerse por envejecimiento a altas temperaturas 464
- 12-9 La reacción eutectoide 465
- 12-10 Control de la reacción eutectoide 470
- 12-11 La reacción martensítica y el revenido 475
- 12-12 Las aleaciones con memoria de forma [AMF] 479

Resumen 480 | Glosario 482 | Problemas 483



Capítulo 13 Tratamiento térmico de aceros y hierros colados 493

- 13-1 Designaciones y clasificación de aceros 494
- 13-2 Tratamientos térmicos simples 498
- 13-3 Tratamientos térmicos isotérmicos 500
- 13-4 Tratamientos térmicos de templado y revenido 504
- 13-5 Efecto de elementos de aleación 509
- 13-6 Aplicación de la templabilidad 511
- 13-7 Aceros especiales 514
- 13-8 Tratamientos superficiales 516
- 13-9 Soldabilidad del acero 518
- 13-10 Aceros inoxidables 519
- 13-11 Hierros fundidos 523

Resumen 529 | Glosario 529 | Problemas 532



Capítulo 14 Aleaciones no ferrosas 539

- 14-1 Aleaciones de aluminio 540
- 14-2 Aleaciones de magnesio y berilio 547
- 14-3 Aleaciones de cobre 548
- 14-4 Aleaciones de níquel y cobalto 552
- 14-5 Aleaciones de titanio 556
- 14-6 Metales refractarios y preciosos 562

Resumen 564 | Glosario 564 | Problemas 565



Capítulo 15 Materiales cerámicos 571

- 15-1 Aplicaciones de materiales cerámicos 572
- 15-2 Propiedades de materiales cerámicos 574
- 15-3 Síntesis y procesamiento de polvos cerámicos 575
- 15-4 Características de los materiales cerámicos sinterizados 580
- 15-5 Vidrios inorgánicos 582
- 15-6 Vidrios-cerámicos 588

- 15-7 Procesamiento y aplicaciones de productos de arcilla 590
- 15-8 Refractarios 591
- 15-9 Otros materiales cerámicos 593

Resumen 595 | Glosario 596 | Problemas 597



Capítulo 16 Polímeros 601

- 16-1 Clasificación de polímeros 602
- 16-2 Polimerización por adición y condensación 605
- 16-3 Grado de polimerización 610
- 16-4 Termoplásticos comunes 612
- 16-5 Relaciones estructura-propiedades en termoplásticos 615
- 16-6 Efecto de la temperatura en termoplásticos 619
- 16-7 Propiedades mecánicas de los termoplásticos 624
- 16-8 Elastómeros (cauchos) 630
- 16-9 Polímeros termoestables o termofijos 635
- 16-10 Adhesivos 637
- 16-11 Procesamiento y reciclaje de polímeros 638

Resumen 643 | Glosario 644 | Problemas 645



Capítulo 17 Materiales compuestos: trabajo en equipo y sinergia en materiales 651

- 17-1 Materiales compuestos endurecidos por dispersión 653
- 17-2 Compuestos particulados 655
- 17-3 Compuestos reforzados con fibras 661
- 17-4 Características de compuestos reforzados con fibras 665
- 17-5 Manufactura de fibras y compuestos 672
- 17-6 Sistemas reforzados con fibra y sus aplicaciones 677
- 17-7 Materiales compuestos laminares 684
- 17-8 Ejemplos y aplicaciones de compuestos laminares 686
- 17-9 Estructuras tipo emparedado 687

Resumen 689 | Glosario 689 | Problemas 691



Capítulo 18 Materiales de construcción 697

- 18-1 Estructura de la madera 698
- 18-2 Contenido de humedad y densidad de la madera 700
- 18-3 Propiedades mecánicas de la madera 702
- 18-4 Expansión y contracción de la madera 704
- 18-5 Madera contrachapada (triplay) 705
- 18-6 Materiales de concreto 705

- 18-7 Propiedades del concreto 707
- 18-8 Concreto reforzado y presforzado 712
- 18-9 Asfalto 713

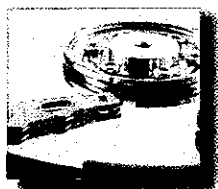
Resumen 714 | Glosario 714 | Problemas 715



Capítulo 19 Materiales electrónicos 719

- 19-1 Ley de Ohm y conductividad eléctrica 720
- 19-2 Estructura de las bandas de sólidos 725
- 19-3 Conductividad de metales y aleaciones 729
- 19-4 Semiconductores 733
- 19-5 Aplicaciones de los semiconductores 741
- 19-6 Repaso general del procesamiento de un circuito integrado 743
- 19-7 Deposición de películas delgadas 746
- 19-8 Conductividad en otros materiales 748
- 19-9 Aisladores y propiedades dieléctricas 750
- 19-10 Polarización en dieléctricos 751
- 19-11 Electrostricción, piezoelectricidad y ferroelectricidad 755

Resumen 758 | Glosario 759 | Problemas 761



Capítulo 20 Materiales magnéticos 767

- 20-1 Clasificación de los materiales magnéticos 768
- 20-2 Dipolos magnéticos y momentos magnéticos 768
- 20-3 Magnetización, permeabilidad y el campo magnético 770
- 20-4 Materiales diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, ferrimagnéticos y superparamagnéticos 773
- 20-5 Estructura del dominio y el ciclo de histéresis 776
- 20-6 La temperatura de Curie 779
- 20-7 Aplicaciones de los materiales magnéticos 780
- 20-8 Materiales magnéticos metálicos y cerámicos 786

Resumen 792 | Glosario 793 | Problemas 794



Capítulo 21 Materiales fotónicos 799

- 21-1 El espectro electromagnético 800
- 21-2 Refracción, reflexión, absorción y transmisión 800
- 21-3 Absorción, transmisión o reflexión selectivas 813
- 21-4 Ejemplos y uso de fenómenos de emisión 814
- 21-5 Sistemas de comunicaciones por fibras ópticas 823

Resumen 824 | Glosario 824 | Problemas 825



Capítulo 22 Propiedades térmicas de materiales 831

- 22-1 Capacidad térmica y calor específico 832
- 22-2 Expansión térmica 834
- 22-3 Conductividad térmica 839
- 22-4 Choque térmico 843

Resumen 845 | Glosario 846 | Problemas 846



Capítulo 23 Corrosión y desgaste 851

- 23-1 Corrosión química 852
- 23-2 Corrosión electroquímica 854
- 23-3 Potencial del electrodo en celdas electroquímicas 857
- 23-4 La corriente de corrosión y la polarización 861
- 23-5 Tipos de corrosión electroquímica 862
- 23-6 Protección contra corrosión electroquímica 868
- 23-7 Degradación microbiana y polímeros biodegradables 874
- 23-8 Oxidación y otras reacciones gaseosas 875
- 23-9 Desgaste y erosión 879

Resumen 881 | Glosario 882 | Problemas 883

**Apéndice A: Propiedades físicas de metales
seleccionados 888**

**Apéndice B: Radios atómicos e iónicos de elementos
seleccionados 891**

Respuestas a problemas seleccionados 893

Índice 901

Prefacio

Cuando las relaciones entre la estructura, las propiedades y el procesamiento de los materiales se comprenden y explotan por completo, los materiales se vuelven accesibles, se transforman de materias *primas* que nos da la naturaleza a *cosas*, los productos y tecnologías que desarrollamos como ingenieros. Cualquier tecnólogo puede encontrar las propiedades materiales en un libro o buscar en bases de datos un material que cumpla con las especificaciones del diseño, pero la habilidad de *innovar* e incorporar materiales *de manera segura* en un diseño tiene sus raíces en la comprensión de cómo manipular las propiedades y la funcionalidad de los materiales a través del control de la estructura de los materiales y las técnicas de procesamiento. El objetivo de este libro es describir los fundamentos y las aplicaciones de la ciencia de materiales para estudiantes de ingeniería como se afirma en el paradigma de la estructura-procesamiento-propiedades.

El desafío de cualquier libro es proveer el balance apropiado de la amplitud y profundidad del tema de interés, proporcionar rigor al nivel apropiado, proveer ejemplos significativos y contenido actual y estimular la excitación intelectual del lector. Nuestro objetivo es proveer la suficiente *ciencia* para que el lector pueda comprender los fenómenos materiales básicos y la *ingeniería* suficiente a fin de preparar un campo amplio de estudiantes para la práctica profesional competente.

Portada

La portada para la sexta edición del texto es una compilación de dos micrografías obtenidas utilizando un instrumento conocido como microscopio de barrido de efecto túnel (STM, por sus siglas en inglés). Un STM escanea una punta afilada sobre la superficie de una muestra. Se aplica un voltaje a la punta. Se dice que los electrones de la punta realizan “efecto túnel” o “se filtran” a la muestra cuando la punta está en proximidad con los átomos de la muestra. La corriente resultante es una función de la punta a la distancia de la muestra y las mediciones de la corriente pueden utilizarse para mapear la superficie de la muestra. La imagen en la portada se titula “Planeta Rojo”. La “tierra” en la portada es una imagen tridimensional de una capa sencilla de la molécula de hexaazatrinaftileno (HATNA) depositada en un cristal sencillo de oro y el “cielo” es una imagen bidimensional sesgada de varias capas de un derivado de hexaazatrifenileno (THAP), también depositado sobre un cristal sencillo de oro y expuesto a un precursor de fondo alto de cobaltoceno. El HATNA y el THAP son semiconductores orgánicos. Pertenecen a una clase de moléculas en forma de disco, las cuales se apilan de manera preferente en columnas. En tal configuración, se potencia el transporte del portador de la carga a lo largo de los núcleos moleculares, lo cual a su vez incrementa la conductividad eléctrica y mejora el desempeño del dispositivo. El color es falso, se ha añadido por efecto artístico. Sieu Ha de la Princeton University obtuvo estas imágenes.

A quién va dirigido y prerrequisitos

Este texto está destinado para una clase introductoria de ciencia de materiales a nivel de primer o segundo año. Se supone que ya hubo un primer curso en química a nivel universitario, así como algún respaldo de física universitaria de primer año. Un curso de cálculo es útil, pero ciertamente no es necesario. El texto no supone que los estudiantes han tomado otros cursos de ingeniería introductorios como estática, dinámica o mecánica de materiales.

Cambios en la sexta edición

Por claridad y precisión se ha puesto particular atención a la revisión del texto. Se ha añadido nuevo contenido como se describe abajo.

Nuevo en esta edición Se ha añadido nuevo contenido al texto incluyendo descripciones de la cristalografía mejoradas y secciones acerca de los alótropos del carbono, la nanoindentación, las propiedades mecánicas de los vidrios metálicos voluminosos, el comportamiento mecánico a escalas de longitud pequeñas, la fabricación de circuitos integrados y la deposición de películas delgadas. Se han adicionado nuevos problemas al final de cada capítulo. También se proveen nuevos suplementos para el instructor.

En la conclusión de los problemas al final de capítulo, encontrará una sección especial con problemas que requieren el uso de Knovel (www.knovel.com). Knovel es un agregador en línea de referencias de ingeniería que incluye manuales, enciclopedias, diccionarios, libros y bases de datos de editores técnicos líderes y sociedades de ingeniería como la American Society of Mechanical Engineers (ASME) y el American Institute of Chemical Engineers (AIChE).

Los problemas de Knovel se basan en el material encontrado en el libro y requieren familiaridad con la obtención de información en línea. Los problemas también están disponibles en línea en www.cengage.com/engineering. Además, las soluciones están accesibles por medio de instructores registrados. Si su institución no posee una suscripción a Knovel o si tiene cualquier pregunta acerca de Knovel, por favor contacte

support@knovel.com
(866) 240-8174
(866) 324-5163

Los problemas de Knovel fueron creados por un equipo de ingenieros dirigidos por Sasha Gurke, vicepresidente a cargo y cofundador de Knovel.

Suplementos para el instructor

Los suplementos al texto incluyen el *Manual de soluciones del instructor* que provee las soluciones completas a problemas seleccionados, diapositivas comentadas en Powerpoint™ y un Banco de Pruebas de preguntas de examen potenciales.

Agradecimientos

Agradecemos a todos aquellos que han contribuido al éxito de las ediciones pasadas y también a los revisores quienes proveyeron una retroalimentación detallada y constructiva sobre la quinta edición:

Deborah Chung, State University of New York, en Búfalo
Derrick R. Dean, University of Alabama en Birmingham
Angela L. Moran, U.S. Naval Academy
John R. Schlup, Kansas State University
Jeffrey Schott, University of Minnesota

Estamos agradecidos con el equipo en Cengage Learning quienes han guiado con cuidado esta sexta edición a través de todas las etapas del proceso de publicación. En particular, agradecemos a Christopher Carson, director ejecutivo del Programa de publicación global en Cengage Learning, Christopher Shortt, editor para Ingeniería global en Cengage Learning, Hilda Gowans, editora de desarrollo, Rose Kernan, editora de producción, Kristiina Paul, investigadora de permisos y fotografías y Lauren Betsos, gerente de mercadotecnia. También agradecemos a Jeffrey Florando del Lawrence Livermore National Laboratory por la entrada de partes del manuscrito y a Venkat Balu por algunos de los nuevos problemas al final de los capítulos en esta edición.

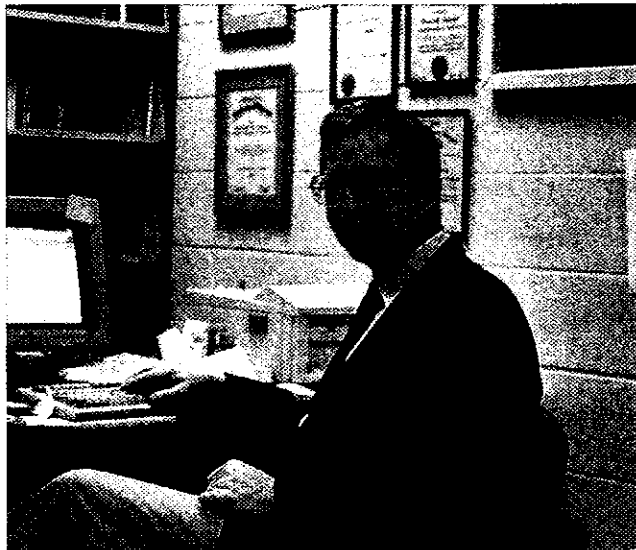
Wendelin Wright agradece a Patricia Wright por su asistencia durante el proceso de corrección de pruebas y a John Bravman por su retroalimentación, contribución a las ilustraciones, paciencia y soporte constante.

Donald R. Askeland
University of Missouri-Rolla, emérito

Pradeep P. Fulay
University of Pittsburgh

Wendelin J. Wright
Santa Clara University

Acerca de los autores



Donald R. Askeland es profesor de enseñanza emérito distinguido de ingeniería metalúrgica en la University of Missouri-Rolla. Recibió sus títulos de la Thayer School of Engineering en Dartmouth College y de la University of Michigan antes de unirse al cuerpo docente de la University of Missouri-Rolla en 1970. El doctor Askeland enseñó varios cursos en ingeniería y producción de materiales a estudiantes en una variedad de planes de estudio de ingeniería y ciencia. Recibió varios premios por excelencia en enseñanza y asesoramiento en la UMR. Fungió como Key Professor para la Foundry Educational Foundation y recibió varios premios por su servicio a esa organización. Su enseñanza e investigación estaban dirigidas principalmente a la fundición y adhesión de metales, en particular la fundición de espuma perdida, lo cual dio por resultado más de 50 publicaciones y cantidad de premios por servicio y mejores artículos de la American Foundry Society.



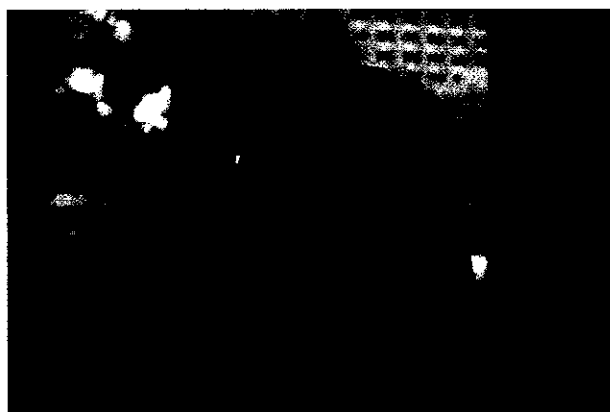
Pradeep P. Fulay es profesor de ciencia e ingeniería de materiales en la University of Pittsburgh, a la cual se unió en 1989, fue promovido a profesor asociado en 1994 y después a profesor de tiempo completo en 1999. El doctor Fulay recibió un doctorado en Ciencia e ingeniería de materiales de la University of Arizona (1989), y un bachiller en tecnología (1983) y una maestría en tecnología (1984) en ingeniería metalúrgica del Indian Institute of Technology Bombay (Mumbai), India.

Ha escrito casi 60 publicaciones y tiene dos patentes registradas en Estados Unidos. Ha recibido los premios por investigación de la Alcoa Foundation y la Ford Foundation.

Ha sido profesor y educador destacado y fue incluido en el cuadro de honor del cuerpo docente en la University of Pittsburgh (2001) por sus servicios y asistencia destacados. De 1992-1999, fue miembro del cuerpo docente de la William Kepler Whiteford en la University of Pittsburgh. De agosto a septiembre de 2002, el doctor Fulay fue científico visitante en el Ford Scientific Research Laboratory en Dearborn, MI.

Las áreas de investigación principales del doctor Fulay son la síntesis química y el procesamiento de materiales cerámicos, cerámicos electrónicos y magnéticos y el desarrollo de materiales y sistemas inteligentes. Parte de la tecnología de fluidos de MR que el doctor Fulay ha desarrollado está siendo transferida a la industria. Fue vicepresidente (2001-2002) y presidente (2002-2003) del Ceramic Educational Council y ha sido miembro del Comité de Programa para la División de Electrónica de la American Ceramic Society desde 1996.

También ha fungido como editor asociado para el *Journal of the American Ceramic Society* (1994-2000). Ha sido el organizador líder para el simposio sobre cerámicas para el proceso sol-gel, comunicaciones inalámbricas y estructuras y sensores inteligentes. En 2002, el doctor Fulay fue elegido miembro de la American Ceramic Society. La investigación del doctor Fulay ha sido apoyada por la National Science Foundation (NSF) y muchas otras organizaciones.



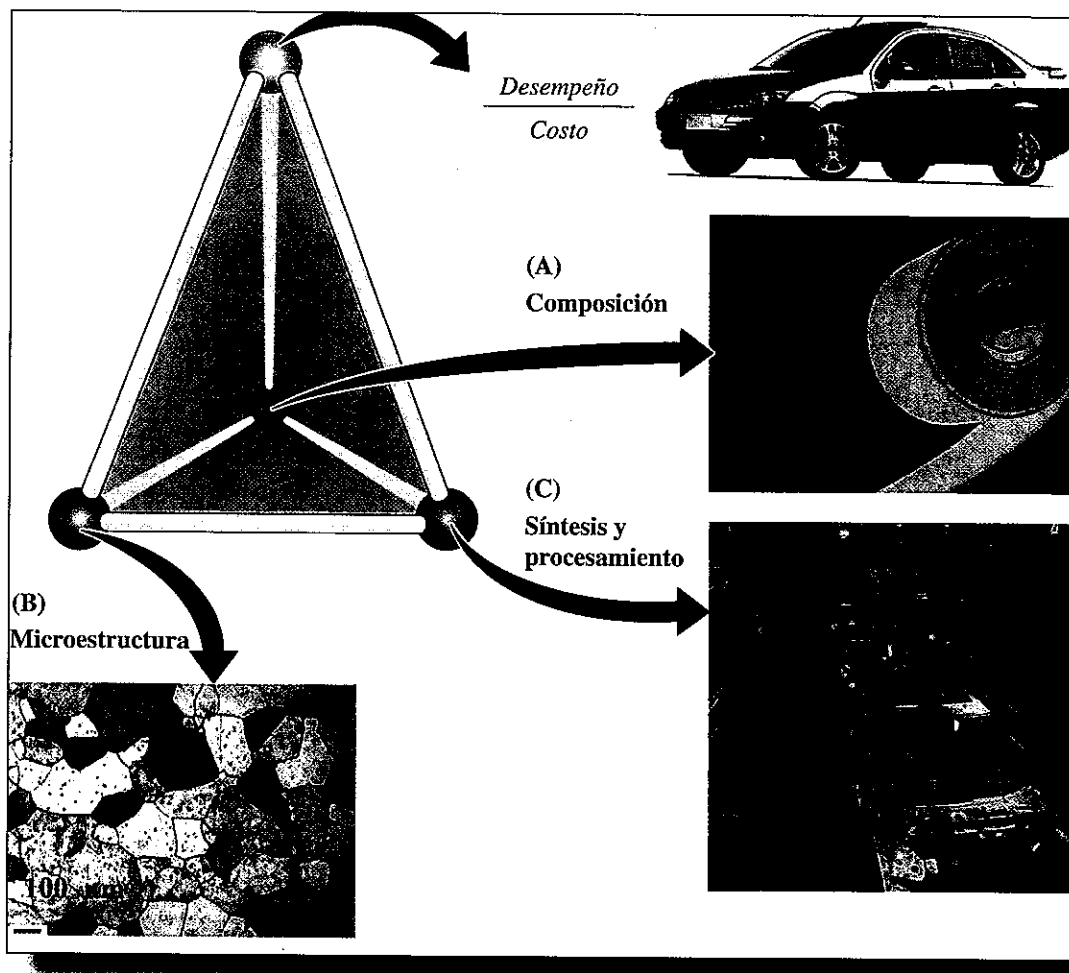
Wendelin Wright fue designada profesora asistente de ingeniería mecánica en la Bucknell University en el otoño de 2010. En el tiempo de la publicación, es la asistente de la profesora Clare Boothe Luce de ingeniería mecánica en la Santa Clara University. Recibió su licenciatura en ciencias, maestría en ciencia y doctorado en ciencias (2003) en Ciencia e ingeniería de materiales de la Stanford University. Después de su graduación, fungió un término posdoctoral en el Lawrence Livermore National Laboratory en la división de Fabricación e ingeniería de materiales y regresó a Stanford como profesora asistente interina en 2005. Se unió al cuerpo docente de la Santa Clara University en 2006.

El interés de investigación de la profesora Wright se enfoca en el comportamiento mecánico de los materiales, particularmente de vidrios metálicos. Recibió el premio Walter J. Gores por excelencia en la enseñanza en 2003, el cual es el honor en enseñanza más alto de la Stanford University, un Presidential Early Career Award para científicos e ingenieros en 2005 y un premio CAREER de la National Science Foundation en 2010.

En el otoño de 2009, la profesora Wright utilizó como texto de referencia primaria *Ciencia e ingeniería de materiales* mientras tomaba y aprobaba el examen de Principios y prácticas de metalurgia para volverse una ingeniera profesional licenciada en California.

Ciencia e ingeniería de materiales

Sexta edición



Los objetivos principales de un científico e ingeniero de materiales son (1) mejorar los materiales existentes y (2) inventar o descubrir nuevos fenómenos, materiales, dispositivos y aplicaciones. Los avances en el campo de la ciencia e ingeniería de materiales se aplican a varios otros campos de estudio como la ingeniería biomédica, la física, la química, la ingeniería ambiental y la tecnología de la información. El tetraedro de la ciencia e ingeniería de materiales mostrado aquí representa el corazón y el alma de este campo. Como se muestra en este diagrama, el objetivo principal de un científico e ingeniero de materiales es desarrollar materiales o dispositivos que tengan el mejor desempeño para una aplicación particular. En la mayoría de los casos, la razón desempeño a costo, a diferencia del desempeño solo, es de importancia máxima. El concepto se muestra como el vértice del tetraedro y las tres esquinas son representativas de A, la composición; B, la microestructura; y C, la síntesis y procesamiento de materiales. Estas están interconectadas y en última instancia afectan la razón desempeño a costo de un material o un dispositivo. La micrografía adjunta muestra la microestructura del acero inoxidable.

Para los científicos e ingenieros de materiales, los materiales son como una paleta de colores para un artista. Al igual que un artista puede crear distintas pinturas utilizando colores diferentes, los científicos de materiales crean y mejoran distintos materiales utilizando diferentes elementos de la tabla periódica y diferentes rutas de síntesis y procesamiento. (Imagen del automóvil cortesía de la Ford Motor Company. Imagen de la fabricación de acero e imagen del chasis de un automóvil cortesía de Digital Vision/Getty Images. Micrografía cortesía de los doctores A. J. Deardo, M. Hua y J. García.)

Capítulo

Introducción a la ciencia e ingeniería de materiales

¿Se ha preguntado alguna vez?

- ¿Qué estudian los científicos e ingenieros de materiales?
- ¿Cómo puede procesarse una hoja metálica de acero para producir un material muy resistente, ligero, absorbente de energía y maleable que se utiliza en la fabricación del chasis de los automóviles?
- ¿Pueden fabricarse circuitos electrónicos flexibles y ligeros utilizando plásticos?
- ¿Qué es un "material inteligente"?

Este capítulo primero lo introducirá en el campo de la ciencia e ingeniería de materiales (CIM) utilizando diferentes ejemplos del mundo real. Después le proporcionará una introducción a la clasificación de los materiales. Aunque la mayoría de los programas de ingeniería requieren que los estudiantes tomen un curso de ciencia de materiales, usted debe abordar su estudio de la ciencia de materiales como algo más que un mero requerimiento. Un conocimiento a profundidad de la ciencia e ingeniería de materiales lo hará un mejor ingeniero y diseñador. La ciencia de materiales es la base de todos los avances tecnológicos y la comprensión de los conceptos básicos de los materiales y sus aplicaciones no sólo lo harán un mejor ingeniero, también lo ayudarán durante el proceso de diseño. Para ser un buen diseñador, debe aprender qué materiales serán apropiados utilizar en distintas aplicaciones. Necesita ser capaz de elegir el material correcto para su aplicación con base en sus propiedades y debe reconocer cómo podrían cambiar estas propiedades con el tiempo y debido al procesamiento. Cualquier ingeniero puede consultar las propiedades materiales en un libro o buscar en bases de datos un material que cumpla las especificaciones del diseño, pero la *habilidad de innovar e incorporar materiales de manera segura* en un diseño tiene sus orígenes en una comprensión de cómo manipular las propiedades y la funcionalidad de los materiales a través del control de la estructura y de las técnicas de procesamiento del material.

El aspecto más importante de los materiales es que son permisibles; los materiales hacen que las cosas sucedan. Por ejemplo, en la historia de la civilización, los materiales como la piedra, el hierro y el bronce desempeñaron una función clave en el desarrollo de la humanidad. En el mundo vertiginoso actual, el descubrimiento de los monocristales de silicio y la comprensión de sus propiedades han permitido el desarrollo de la era de la información.

En este libro, se proveerán ejemplos convincentes de aplicaciones en el mundo real de los materiales de ingeniería. La diversidad de aplicaciones y los usos únicos de los materiales ilustran por qué un buen ingeniero necesita comprender y conocer cómo aplicar los principios de la ciencia e ingeniería de materiales.

1-1 ¿Qué es la ciencia e ingeniería de materiales?

La **ciencia e ingeniería de materiales (CIM)** es un campo interdisciplinario de la ciencia e ingeniería que estudia y manipula la composición y la estructura de los materiales a través de escalas de longitud para controlar las propiedades de los materiales a través de la síntesis y el procesamiento. El término **composición** se refiere a la constitución química de un material. El término **estructura** se refiere a la descripción del arreglo de los átomos, como se observa a diferentes niveles de detalle. Los científicos e ingenieros de materiales no sólo tratan con el desarrollo de materiales, sino también con la **síntesis** y el **procesamiento** de materiales y los procesos de fabricación relacionados con la producción de componentes. El término “síntesis” se refiere a cómo se fabrican materiales a partir de sustancias químicas de estado natural o hechas por el hombre. El término “procesamiento” se refiere a cómo se transforman materiales en componentes útiles para causar cambios en las propiedades de diferentes materiales. Una de las funciones más importantes de los científicos e ingenieros de materiales es establecer las relaciones entre las propiedades de un material o un dispositivo y el desempeño y la microestructura del material, su composición y la manera en la que el material o dispositivo se sintetizó y procesó. En la **ciencia de materiales**, el énfasis está en las relaciones básicas entre la síntesis y el procesamiento, la estructura y las propiedades de los materiales. En la **ingeniería de materiales**, el enfoque está en cómo convertir o transformar los materiales en dispositivos o estructuras útiles.

Uno de los aspectos más fascinantes de la ciencia de materiales involucra la investigación de la estructura de un material. La estructura de los materiales tiene una influencia profunda sobre muchas propiedades de los materiales, ¡aun si la composición general no cambia! Por ejemplo, si toma un alambre de cobre puro y lo dobla de manera repetida, ¡el alambre no sólo se vuelve más duro sino también se vuelve cada vez más quebradizo! Con el tiempo, el alambre de cobre puro se vuelve tan duro y quebradizo ¡que se romperá! La resistividad eléctrica del alambre también aumentará a medida que se doble de manera repetida. En este ejemplo sencillo, observe que no se cambió la composición del material (es decir, su constitución química). Los cambios en las propiedades del material se deben a un cambio en su estructura interna. Si examina el alambre después de doblarse observará lo mismo que antes; sin embargo, su estructura ha cambiado a escala microscópica. La estructura a la escala microscópica se le conoce como **microestructura**. Si es posible comprender lo que ha cambiado de manera microscópica, se comenzarán a descubrir maneras de controlar las propiedades de los materiales.

Examine un ejemplo utilizando el **tetraedro de la ciencia e ingeniería de materiales** presentado en la página de apertura del capítulo. Observe las “hojas de acero” utilizadas en la fabricación de chasis de automóviles (figura 1-1). Los aceros, como puede saber, han sido utilizados en la fabricación durante más de 100 años, pero probablemente existieran de una forma cruda durante la Era del Hierro, hace miles de años. En la fabricación del chasis de automóviles, se necesita un material que posea una resistencia extremadamente alta pero que se transforme con facilidad en contornos aerodinámicos. Otra consideración es la eficiencia del combustible, por lo que la hoja de acero también debe ser delgada y ligera. Las hojas de acero también deben ser capaces de absorber cantidades significativas de energía en el caso de un choque, incrementando por tanto la seguridad del vehículo. Estos requerimientos son un tanto contradictorios.

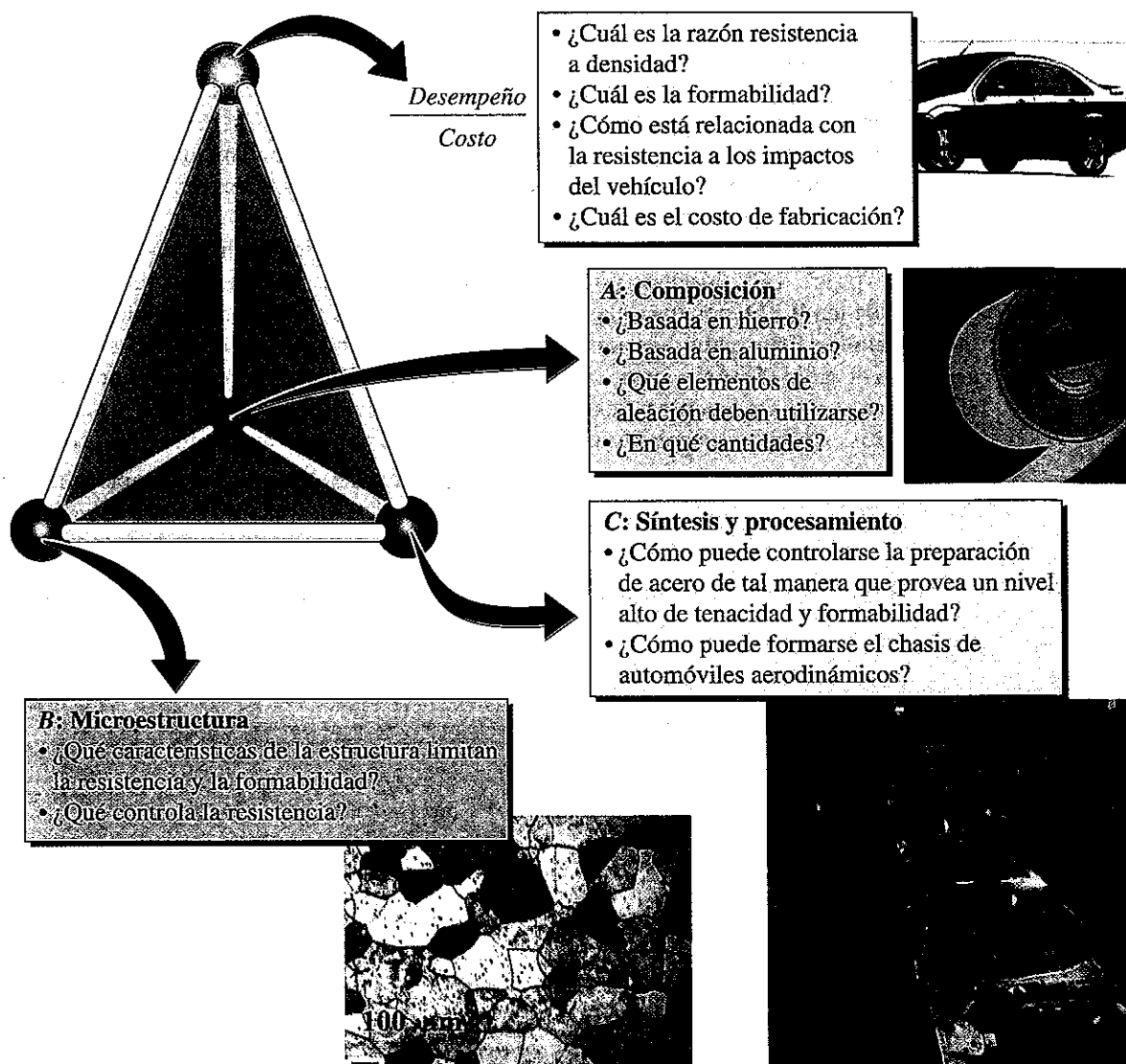


Figura 1-1 Aplicación del tetraedro de la ciencia e ingeniería de materiales a las hojas de acero para los chasis de automóviles. Observe que la composición, la microestructura y la síntesis-procesamiento están interconectados y afectan la razón desempeño a costo. (Imagen del automóvil cortesía de la Ford Motor Company. Imagen de la fabricación de acero e imagen de los chasis de automóviles cortesía de Digital Vision/Getty Images. Micrografía cortesía de los doctores A. J. Deardo, M. Hua y J. García.)

Por tanto, en este caso, los científicos de materiales se preocupan por

- la composición;
- la resistencia;
- el peso;
- las propiedades de absorción de energía, y
- la maleabilidad (formabilidad) de las hojas de acero.

Los científicos en materiales examinarían el acero a un nivel microscópico a fin de determinar si sus propiedades pueden alterarse para que cumplan todos estos requerimientos.

También tendrían que estimar el costo del procesamiento del acero junto con otras consideraciones. ¿Cómo se moldea tal acero en un chasis de automóviles de manera efectiva con relación al costo? ¿El proceso de moldeado afecta las propiedades mecánicas del acero? ¿Qué tipo de recubrimientos pueden desarrollarse para hacer al acero resistente a la corrosión? En algunas aplicaciones, es necesario saber si estos aceros pudieran soldarse con facilidad. A partir de esta explicación, usted puede ver que se necesitan considerar varios aspectos durante el diseño y la selección de materiales para cualquier producto.

Vea un ejemplo más de una clase de materiales conocidos como polímeros semiconductores (figura 1-2). Muchos polímeros semiconductores se han procesado en diodos emisores de luz (LED, por sus siglas en inglés). Ha visto los LED en despertadores, relojes y otras pantallas. Estas pantallas con frecuencia utilizan compuestos inorgánicos basados en arseniuro de galio (GaAs) y otros materiales. La ventaja del uso de plásticos para la microelectrónica es que son ligeros y flexibles. Las preguntas que deben responder los científicos e ingenieros en materiales con las aplicaciones de los polímeros semiconductores son

- ¿Cuáles son las relaciones entre la estructura de los polímeros y sus propiedades eléctricas?
- ¿Cómo pueden fabricarse dispositivos utilizando estos plásticos?
- ¿Estos dispositivos serán compatibles con la tecnología del chip de silicio existente?

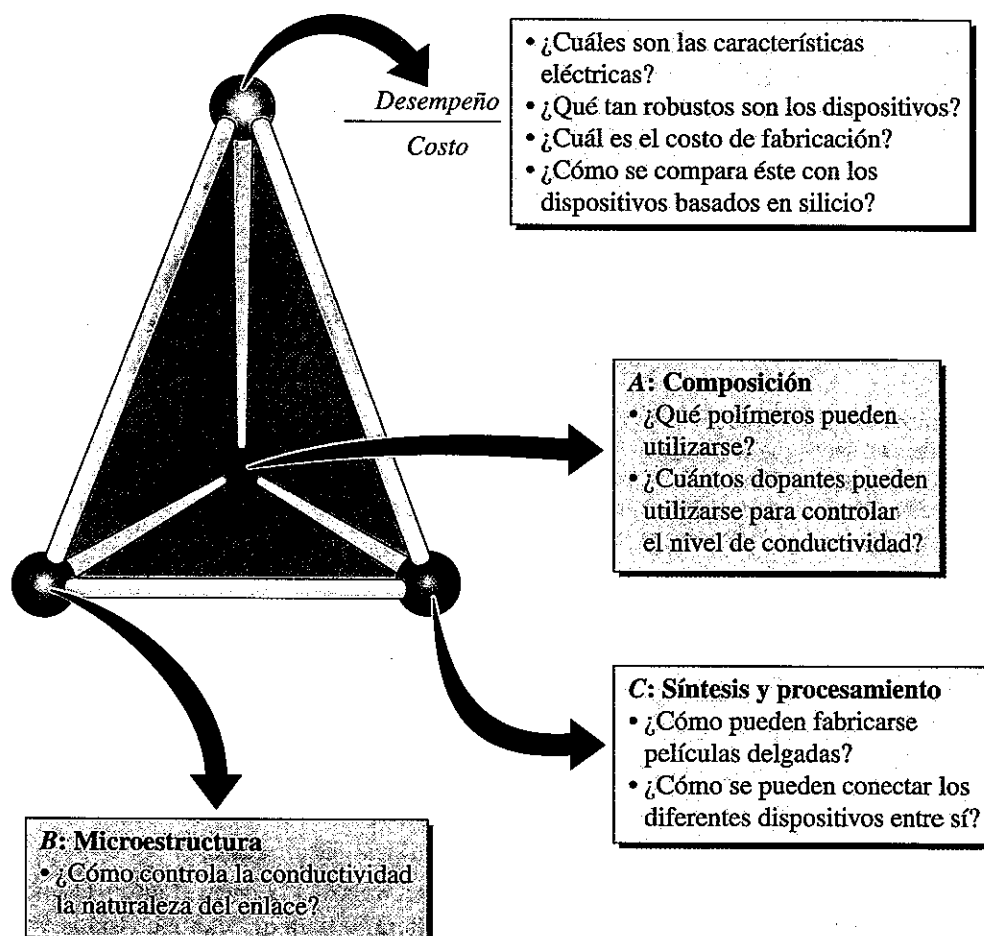


Figura 1-2 Aplicación del tetraedro de la ciencia e ingeniería de materiales a polímeros semiconductores para la microelectrónica.

- ¿Qué tan robustos son estos dispositivos?
- ¿Cómo se compararán el desempeño y el costo de estos dispositivos con los dispositivos tradicionales?

Éstos son sólo algunos de los factores que los ingenieros y científicos deben considerar durante el desarrollo, diseño y fabricación de los dispositivos de polímeros semiconductores.

1-2 Clasificación de los materiales

Existen formas diferentes para clasificar los materiales. Una forma es describir cinco grupos (tabla 1-1):

TABLA 1-1 ■ Ejemplos, aplicaciones y propiedades representativas para cada categoría de materiales

	Ejemplos de aplicaciones	Propiedades
Metales y aleaciones		
Cobre	Alambre conductor eléctrico	Conductividad eléctrica alta, buena formabilidad
Hierro colado gris	Bloques de motores de automóviles	Moldeable, maquinable, amortiguador de vibraciones
Aceros de aleación	Llaves inglesas, chasis de automóviles	Endurecimiento significativo por tratamiento térmico
Cerámicas y vidrios		
$\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O--CaO}$	Vidrios de ventanas	Ópticamente transparente, aislante térmico
Al_2O_3 , MgO, SiO_2	Refractarios (es decir, recubrimientos resistentes al calor de hornos) para contención de metal fundido	Aislantes térmicos, soportan altas temperaturas, relativamente inertes al metal fundido
Titanato de bario	Capacitores para la microelectrónica	Alta capacidad de almacenamiento de carga
Sílice	Fibras ópticas para la tecnología de la información	Índice de refracción, pérdidas ópticas bajas
Polímeros		
Poliétileno	Empaquetamiento de alimentos	Fácilmente convertible a películas delgadas, flexibles y herméticas
Epoxi	Encapsulación de circuitos integrados	Aislante eléctricamente y resistente a la humedad
Fenólicos	Adhesivos para unir capas en madera laminada	Fuertes, resistentes a la humedad
Semiconductores		
Silicio	Transistores y circuitos integrados	Comportamiento eléctrico único
GaAs	Sistemas optoelectrónicos	Convierte señales eléctricas en luz, láseres, diodos láser, etc.
Compuestos		
Grafito-epoxi	Componentes para aviones	Razón resistencia-peso alta
Carburo de tungsteno-cobalto	Herramientas de corte de carburo para maquinado	Dureza alta, pero buena resistencia al impacto
Acero revestido con titanio	Contenedores de reactores	Costo bajo y resistencia alta del acero con la resistencia a la corrosión del titanio

1. **metales y aleaciones;**
2. **cerámicas, vidrios y vidrios-cerámicos;**
3. **polímeros (plásticos);**
4. **semiconductores, y**
5. **materiales compuestos.**

Los materiales en cada uno de estos grupos poseen estructuras y propiedades distintas. Las diferencias en resistencia, las cuales se comparan en la figura 1-3, ilustran el intervalo amplio de propiedades a partir de las cuales pueden seleccionar los ingenieros. Dado que los materiales metálicos se utilizan en gran medida en aplicaciones de soporte carga, sus propiedades mecánicas son de gran interés práctico. Aquí se introducirán de manera breve. El término “esfuerzo” se refiere a la carga o fuerza por unidad de área. La “deformación unitaria” se refiere a la elongación o cambio en dimensión dividido entre la dimensión original. La aplicación del esfuerzo ocasiona la “deformación”. Si la deformación desaparece después de que se quita la carga o el esfuerzo aplicado, se dice que la deformación es “elástica”. Si la deformación permanece después de que se quita el esfuerzo, se dice que la deformación es “plástica”. Cuando la deformación es elástica, el esfuerzo y la deformación están relacionados de manera lineal; a la pendiente del diagrama esfuerzo-deformación unitaria se le conoce como módulo elástico o de Young. Al nivel de esfuerzo necesario para iniciar la deformación plástica se le conoce como “límite elástico”. El porcentaje de deformación máximo que se puede obtener es una medida de la ductilidad de un material metálico. Estos conceptos se explicarán más adelante en los capítulos 6 y 7.

Metales y aleaciones Los metales y aleaciones incluyen aceros, aluminio, magnesio, zinc, hierro colado, titanio, cobre y níquel. Una aleación es un metal que contiene adiciones de uno o más metales o no metales. En general, los metales tienen buenas conductividades eléctricas y térmicas. Los metales y las aleaciones tienen resistencias relativamente altas, rigidez alta, ductilidad o formabilidad y resistencia al impacto. Son particularmente útiles para aplicaciones estructurales o de carga. Aunque en ocasiones se utilizan metales puros, las aleaciones proveen una mejora en una propiedad deseable en particular o permiten mejores combinaciones de las propiedades.

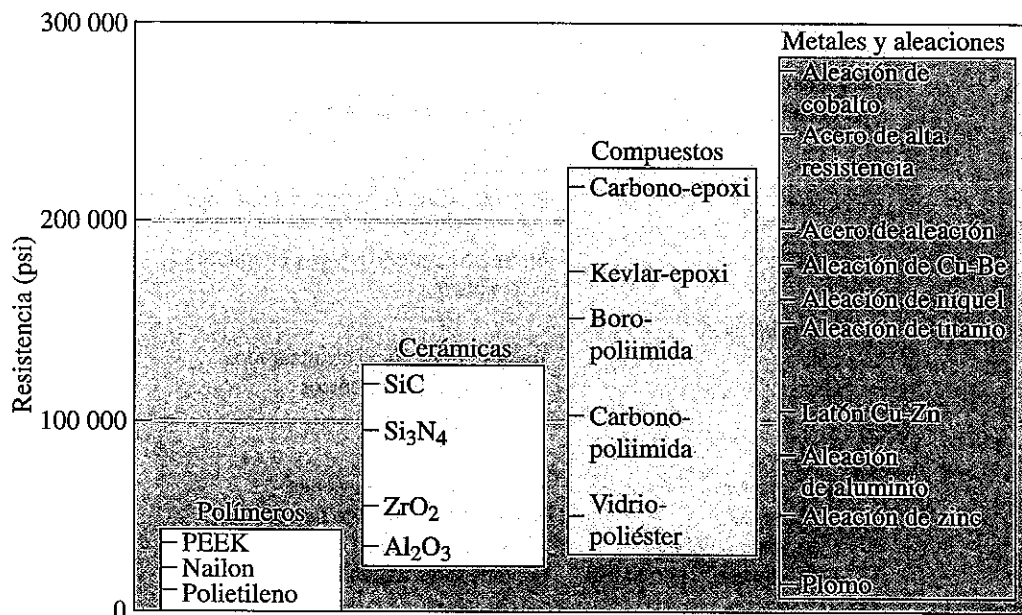


Figura 1-3 Resistencias representativas de varias categorías de materiales.

Cerámicas Las cerámicas pueden definirse como materiales cristalinos inorgánicos. La arena de la playa y las rocas son ejemplos de cerámicas de estado natural. Las cerámicas avanzadas son materiales preparados por medio de la refinación de cerámicas de estado natural y otros procesos especiales. Las cerámicas avanzadas se utilizan en los sustratos que albergan chips de computadora, sensores y activadores, capacitores, comunicaciones inalámbricas, generadores de chispa, inductores y aislantes eléctricos. Algunas cerámicas se utilizan como recubrimientos de barrera para proteger los sustratos metálicos en motores de turbinas. Las cerámicas también se utilizan en productos de consumo como pinturas, plásticos, neumáticos y en aplicaciones industriales tales como losetas para transbordadores espaciales, soporte de catalizadores y los sensores de oxígeno utilizados en los automóviles. Las cerámicas tradicionales se utilizan para fabricar ladrillos, vajillas, sanitarios, tinas de baño, refractarios (material resistente al calor) y abrasivos. En general, debido a la presencia de porosidad (agujeros pequeños), las cerámicas no conducen bien el calor; deben calentarse a temperaturas muy altas antes de fundirse. Las cerámicas son resistentes y duras, pero también son quebradizas. Por lo regular se preparan polvos finos de cerámicas y se convierten en distintas formas. Las nuevas técnicas de procesamiento fabrican cerámicas lo suficientemente resistentes a la fractura que pueden utilizarse en aplicaciones de carga, como los impulsores en los motores de turbinas. Las cerámicas tienen una resistencia excepcional bajo compresión. ¿Puede creer que todo un camión de bomberos puede soportarse utilizando cuatro tazas cerámicas para café?

Vidrios y vidrios-cerámicos El vidrio es un material amorfo, con frecuencia, aunque no siempre, derivado de un líquido fundido. El término “amorfo” se refiere a materiales que no poseen un arreglo regular y periódico de átomos. Los materiales amorfos se explicarán en el capítulo 3. La industria de la fibra óptica se basa en fibras ópticas basadas en vidrios de sílice de alta pureza. Los vidrios también se utilizan en casas, automóviles, pantallas de computadoras y televisores y en cientos de otras aplicaciones. Los vidrios pueden tratarse de manera térmica (templarse) para hacerlos más resistentes. La formación de vidrios y la nucleación (formación) de cristales pequeños dentro de ellos por medio de un proceso térmico especial crean materiales a los que se conoce como vidrios-cerámicos. El Zerodur™ es un ejemplo de un material de vidrio-cerámico que se utiliza para construir los sustratos de espejos para telescopios grandes (por ejemplo, los telescopios Chandra y Hubble). Los vidrios y los vidrios-cerámicos se procesan por lo general por fusión y colado.

Polímeros Los polímeros por lo general son materiales orgánicos. Se producen utilizando un proceso conocido como **polimerización**. Los materiales poliméricos incluyen al caucho (elastómeros) y muchos tipos de adhesivos. Los polímeros comunes son buenos aislantes eléctricos y térmicos, aunque existen excepciones como los polímeros semiconductores explicados anteriormente en este capítulo. Aunque poseen una resistencia más baja, los polímeros tienen una **razón de resistencia a peso** muy buena. Por lo regular no son adecuados para el uso a altas temperaturas. Muchos polímeros tienen muy buena resistencia a sustancias químicas corrosivas. Los polímeros tienen miles de aplicaciones que van de chalecos antibalas, discos compactos (CD), cuerdas y pantallas de cristal líquido (LCD) a vestimenta y tazas para café. Los polímeros **termoplásticos**, en los que las cadenas moleculares grandes no están conectadas de manera rígida, tienen buena ductilidad y formabilidad; los polímeros **termoestables** son más resistentes pero más quebradizos debido a que las cadenas moleculares están enlazadas de manera compacta (figura 1-4). Los polímeros se utilizan en muchas aplicaciones, incluyendo dispositivos electrónicos. Los termoplásticos se fabrican moldeando su forma fundida. Los termoestables por lo regular se cuecen en moldes. Los **plásticos** contienen aditivos que mejoran las propiedades de los polímeros.

Semiconductores Los semiconductores basados en silicio, germanio y arseniuro de galio como los utilizados en computadoras y dispositivos electrónicos son parte de una clase amplia de materiales conocidos como materiales electrónicos. La conductividad eléctrica de los materiales semiconductores está entre la de los aislantes cerámicos y los conductores metálicos. Los semiconductores han permitido la era de la información. En algunos semicon-

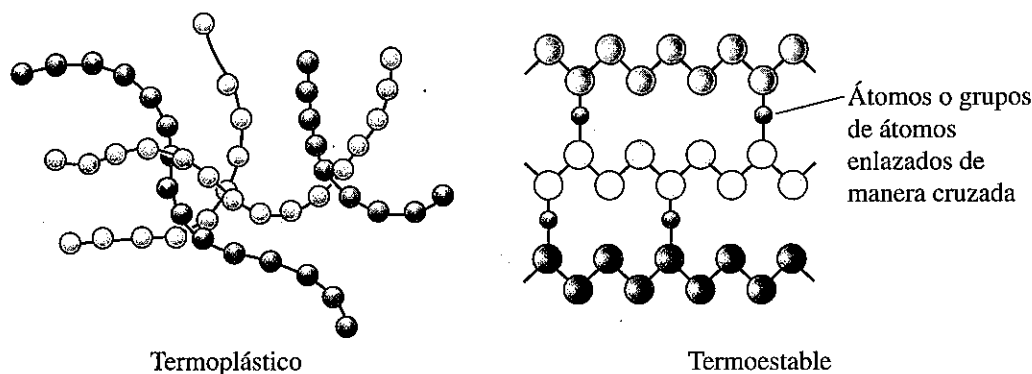


Figura 1-4 La polimerización ocurre cuando se combinan moléculas pequeñas, representadas por los círculos, para producir moléculas más grandes, o polímeros. Las moléculas de polímero pueden tener una estructura que consista en varias cadenas que estén enredadas pero no conectadas (termoplásticos) o pueden formar redes tridimensionales en las cuales las cadenas tengan enlaces cruzados (termoestables).

ductores, el nivel de conductividad puede controlarse para producir dispositivos electrónicos tales como transistores, diodos, etc., que se utilizan para construir circuitos integrados. En muchas aplicaciones, se necesitan monocristales grandes de semiconductores. Éstos se producen a partir de materiales fundidos. Con frecuencia, también se fabrican películas delgadas de materiales semiconductores utilizando procesos especializados.

Materiales compuestos La idea principal en el desarrollo de compuestos es combinar las propiedades de distintos materiales. Se forman a partir de dos o más materiales, produciendo propiedades que no se encuentran en ningún material sencillo. El concreto, la madera laminada y la fibra de vidrio son ejemplos de materiales compuestos. La fibra de vidrio se prepara por medio de la dispersión de fibras de vidrio en una matriz de polímero. Las fibras de vidrio hacen más rígido al polímero, sin incrementar de manera significativa su densidad. Con los compuestos se pueden producir materiales ligeros, resistentes, dúctiles y resistentes a las temperaturas o pueden producirse herramientas de corte rígidas, pero resistentes al impacto que de otra manera se romperían. Los aviones avanzados y los vehículos aeroespaciales dependen en gran medida de compuestos como los polímeros reforzados con fibra de carbono (figura 1-5). El equipamiento deportivo tal como bicicletas, palos de golf, raquetas de tenis y similares también hacen uso de distintos tipos de materiales compuestos que son ligeros y rígidos.

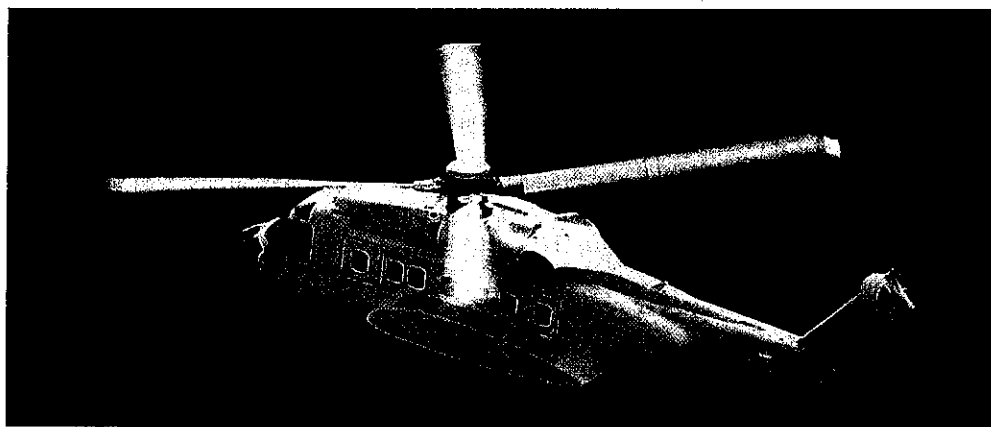


Figura 1-5 El ala-X para helicópteros avanzados depende de un material compuesto de polímero reforzado con fibras de carbono. (Cortesía de Sikorsky Aircraft Division – United Technologies Corporation.)

1-3 Clasificación funcional de los materiales

Los materiales se pueden clasificar basados en si la función más importante que desempeñan es mecánica (estructural), biológica, eléctrica, magnética u óptica. Esta clasificación de los materiales se muestra en la figura 1-6. Se muestran algunos ejemplos de cada categoría. Estas categorías pueden dividirse en subcategorías.

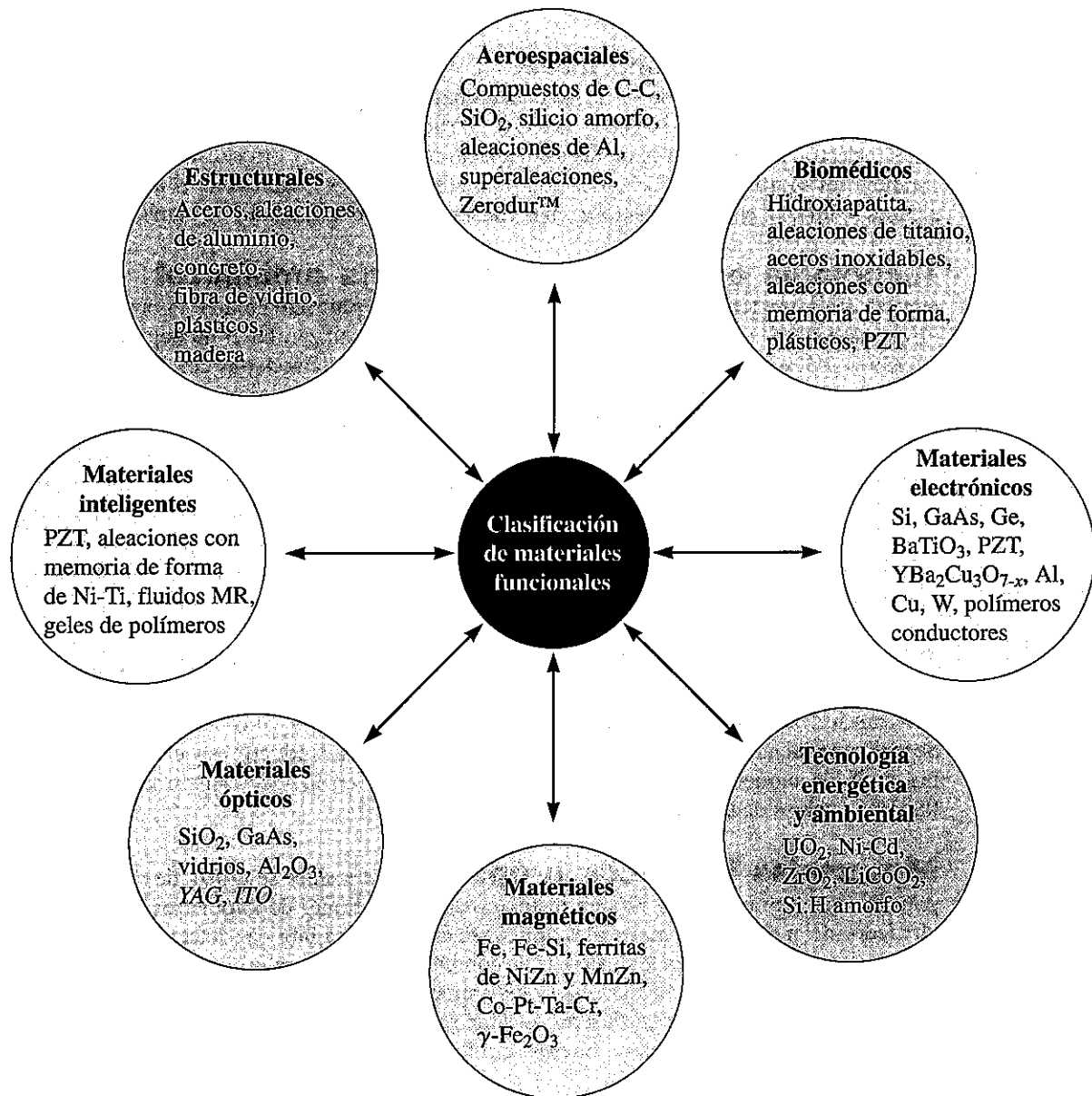


Figura 1-6 Clasificación funcional de los materiales. Observe que los metales, los plásticos y las cerámicas aparecen en categorías distintas. Se provee un número limitado de ejemplos en cada categoría.

Aeroespaciales En el vuelo histórico de los hermanos Wright se utilizaron materiales ligeros tales como madera y una aleación de aluminio (que de manera accidental le dieron aún más resistencia al motor al contaminarse con el cobre del molde utilizado en su colado). En la actualidad, el transbordador espacial de la NASA usa polvo de aluminio para cohetes impulsores. Las aleaciones de aluminio, los plásticos, la sílice de las losetas para transbordadores espaciales y muchos otros materiales pertenecen a esta categoría.

Biomédicos Los huesos y dientes están hechos, en parte, de una cerámica formada de manera natural conocida como hidroxiapatita. Varios órganos artificiales, partes de reemplazo de huesos, cánulas cardiovasculares, aparatos de ortodoncia y otros componentes se fabrican utilizando diferentes plásticos, aleaciones de titanio y aceros inoxidables no magnéticos. Los sistemas de imagen ultrasónica usan cerámicas conocidas como PZT (titanato de zirconio de plomo). Los imanes utilizados para la imagen de resonancia magnética utilizan superconductores metálicos de niobio con base de estaño.

Materiales electrónicos Como se mencionó anteriormente, los semiconductores, como los hechos de silicio, se utilizan para fabricar circuitos integrados para chips de computadoras. El titanato de bario (BaTiO_3), el óxido de tantalio (Ta_2O_5) y muchos otros materiales dieléctricos se utilizan para fabricar capacitores cerámicos y otros dispositivos. Los superconductores se utilizan en la fabricación de imanes poderosos. El cobre, el aluminio y otros metales se utilizan como conductores en la transmisión de electricidad y en la microelectrónica.

Tecnología energética y tecnología ambiental La industria nuclear utiliza materiales como el dióxido de uranio y el plutonio como combustibles. Varios otros materiales, como vidrios y aceros inoxidables, se utilizan en el manejo de materiales nucleares y desechos radiactivos. Las nuevas tecnologías relacionadas con las baterías y las celdas de combustible usan varios materiales cerámicos como la zirconia (ZrO_2) y los polímeros. La tecnología de las baterías ha ganado una importancia significativa debido a la necesidad de muchos dispositivos electrónicos que requieren energía portátil y más duradera. Las celdas de combustible también se utilizarán en automóviles eléctricos. La industria ólea y petrolera utiliza de manera amplia zeolitas, alúmina y otros materiales como sustratos catalizadores. Utilizan Pt, Pt/Rh y varios otros metales como catalizadores. Muchas tecnologías de membranas para la purificación de líquidos y gases usan cerámicas y plásticos. La energía solar se genera utilizando materiales como silicio amorfo (a:Si:H).

Materiales magnéticos Los discos duros de las computadoras usan muchos materiales cerámicos, metálicos y poliméricos. Los discos duros de las computadoras se fabrican utilizando aleaciones basadas en cobalto-platino-tantalio-cromo (Co-Pt-Ta-Cr). Se utilizan muchas ferritas magnéticas con el fin de fabricar inductores y componentes para las comunicaciones inalámbricas. Los aceros basados en hierro y silicio se utilizan para fabricar núcleos de transformadores.

Materiales fotónicos u ópticos La sílice se utiliza de manera amplia para fabricar fibras ópticas. Se han instalado casi 10 millones de kilómetros de fibra óptica alrededor del mundo. Los materiales ópticos se utilizan para fabricar detectores semiconductores y láseres utilizados en los sistemas de comunicación de fibra óptica y otras aplicaciones. De manera similar, la alúmina (Al_2O_3) y los granates de itrio aluminio (YAG, por sus siglas en inglés) se utilizan para fabricar láseres. El silicio amorfo se utiliza para fabricar celdas solares y módulos fotovoltaicos. Los polímeros se utilizan para fabricar pantallas de cristal líquido (LCD).

Materiales inteligentes Un material inteligente puede sentir y responder a un estímulo externo como un cambio en la temperatura, la aplicación de un esfuerzo o un

cambio en la humedad o en el ambiente químico. Por lo regular un sistema basado en materiales inteligentes consiste en sensores y activadores que leen cambios e inician una acción. Un ejemplo de un material inteligente de manera pasiva es el titanato de zirconio de plomo (PZT) y las aleaciones con memoria de forma. Cuando se procesa de manera apropiada, el PZT puede someterse a un esfuerzo y se genera un voltaje. Este efecto se utiliza para fabricar dispositivos como generadores de chispa para parrillas de gas y sensores que pueden detectar objetos bajo el agua como peces y submarinos. Otros ejemplos de materiales inteligentes incluyen los fluidos magnetoreológicos o MR. Éstos son pinturas magnéticas que responden a campos magnéticos. Estos materiales se están utilizando en los sistemas de suspensión de los automóviles, incluyendo modelos de General Motors, Ferrari y Audi. Otros ejemplos de materiales y sistemas inteligentes son los vidrios fotocromáticos y los espejos con oscurecimiento automático.

Materiales estructurales Estos materiales están diseñados para soportar algún tipo de esfuerzo. Se utilizan aceros, concreto y compuestos para construir edificios y puentes. Los aceros, los vidrios, los plásticos y los compuestos también se utilizan de manera amplia para fabricar automóviles. En estas aplicaciones, se necesitan con frecuencia combinaciones de resistencia, rigidez y tenacidad ante distintas condiciones de temperatura y carga.

1-4 Clasificación de los materiales con base en la estructura

Como se mencionó con anterioridad, el término “estructura” se refiere al arreglo de los átomos de un material; a la estructura a una escala microscópica se le conoce como “microestructura”. Es posible observar estos arreglos a diferentes escalas, que van de unas cuantas unidades angstrom a un milímetro. En el capítulo 3 se aprenderá que algunos materiales pueden ser **cristalinos** (los átomos del material están ordenados de manera periódica) o pueden ser **amorfos** (el arreglo de los átomos del material no tienen un orden de largo alcance). Algunos materiales cristalinos pueden estar en forma de un cristal y se les conoce como **monocristales**. Otros consisten en muchos cristales o **granos**, y se les conoce como **policristalinos**. Las características de los cristales o granos (tamaño, forma, etc.) y las de las regiones entre ellos, conocidas como **límites de grano**, también afectan las propiedades de los materiales. Se explicarán a detalle estos conceptos en capítulos posteriores. En la figura 1-1 se muestra una micrografía de un acero inoxidable que muestra granos y límites de grano.

1-5 Efectos ambientales y diversos

Las relaciones estructura-propiedad en los materiales fabricados en componentes con frecuencia están influenciadas por el entorno al que el material está sometido durante su uso. Esto puede incluir la exposición a altas o bajas temperaturas, esfuerzos cíclicos, impacto súbito, corrosión u oxidación. Estos efectos deben tomarse en cuenta en el diseño para asegurar que los componentes no fallen de manera inesperada.

Temperatura Los cambios en temperatura alteran de manera drástica las propiedades de los materiales (figura 1-7). Los metales y las aleaciones que se han endurecido por medio de ciertos tratamientos térmicos o técnicas de formación perderán su resistencia cuando se calienten. Un recordatorio trágico de esto es el colapso de las vigas de acero utilizadas en

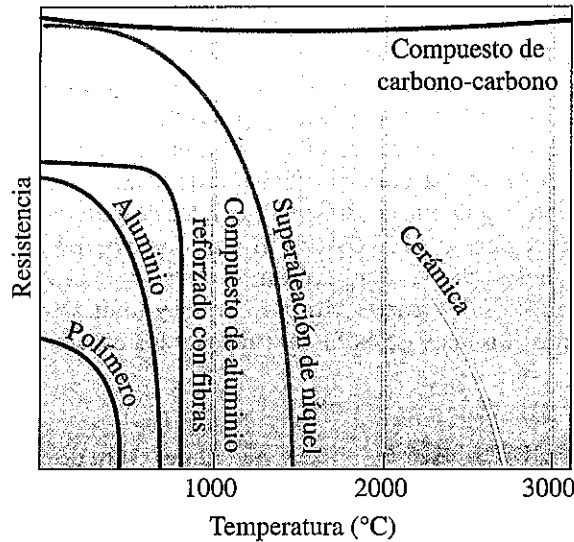


Figura 1-7

El aumento en la temperatura por lo general reduce la resistencia de un material. Los polímeros sólo son adecuados a bajas temperaturas. Algunos compuestos, como los compuestos de carbono-carbono, las aleaciones especiales y las cerámicas, tienen excelentes propiedades a altas temperaturas.

las torres del World Trade Center el 11 de septiembre de 2001. Aunque las torres soportaron el impacto inicial de las colisiones, sus estructuras de acero se debilitaron por las temperaturas elevadas ocasionadas por el fuego, y que condujeron por último al colapso.

Las altas temperaturas cambian la estructura de las cerámicas y ocasionan que los polímeros se fundan o se carbonicen. En el otro extremo, las temperaturas muy bajas pueden ocasionar que un metal o un polímero fallen de manera quebradiza, aun cuando las cargas aplicadas sean bajas. Este resquebrajamiento a baja temperatura fue un factor que ocasionó que el *Titanic* se fracturara y se hundiera. De manera similar, el accidente del *Challenger* en 1986 se debió en parte al resquebrajamiento de los anillos selladores de caucho. Las razones de por qué algunos polímeros y materiales metálicos se vuelven quebradizos son diferentes. Estos conceptos se explicarán en capítulos posteriores.

El diseño de materiales con resistencia mejorada a las temperaturas extremas es esencial en muchas tecnologías, como se ilustra por medio del aumento en las temperaturas de operación de los aviones y los vehículos aeroespaciales (figura 1-8). A medida que se alcanzan velocidades más rápidas, ocurre más calentamiento de la cubierta del vehículo debido a la fricción con el aire. También los motores operan de manera más eficiente a temperaturas más altas. Para lograr mayor velocidad y mejor rendimiento de combustible, nuevos materiales han

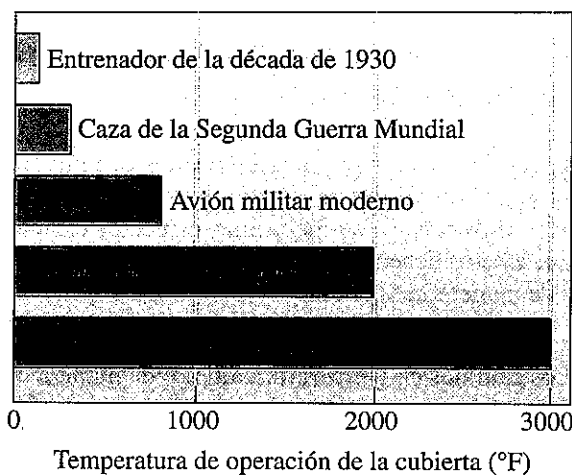


Figura 1-8

Las temperaturas de operación de la cubierta de las aeronaves ha aumentado con el desarrollo de materiales mejorados. (Conforme a M. Steinberg, *Scientific American*, octubre de 1986.)

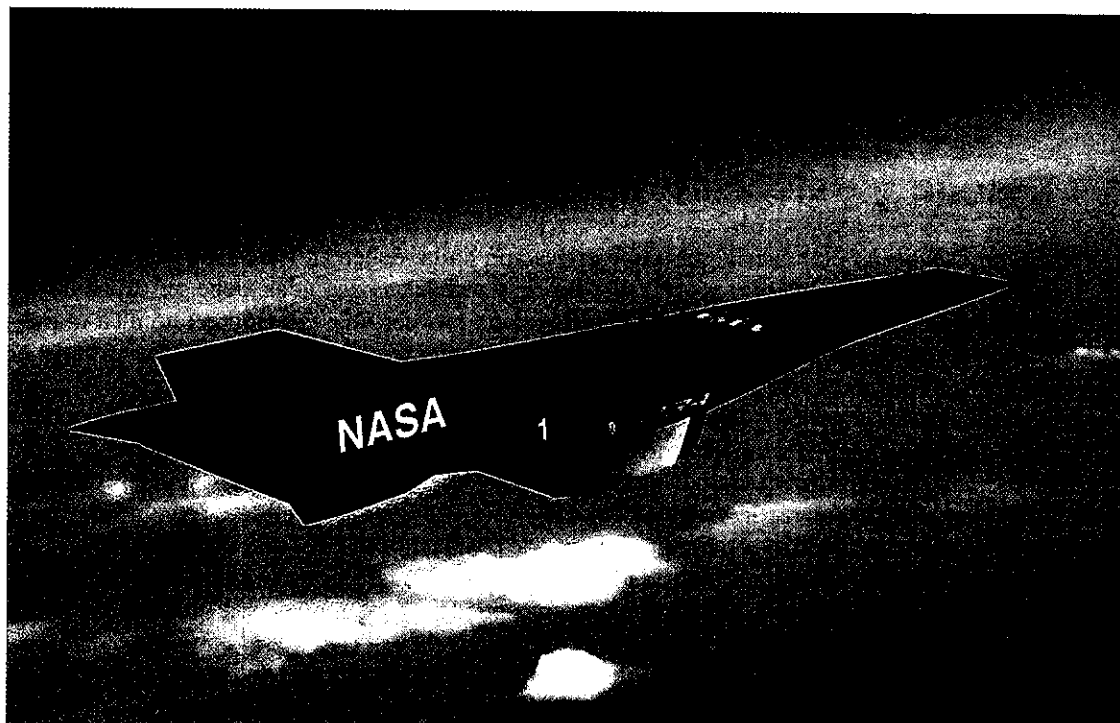


Figura 1-9 El avión no tripulado X-43A de la NASA es un ejemplo de un vehículo hipersónico avanzado. (Cortesía del NASA Dryden Flight Research Center (NASA-DFRC).)

aumentado de forma gradual las temperaturas tolerables para la cubierta y el motor. El avión no tripulado X-43A de la NASA es un ejemplo de vehículo hipersónico avanzado (figura 1-9). Se mantuvo a una velocidad de aproximadamente Mach 10 (7 500 millas/h o 12 000 km/h) en 2004. Los materiales utilizados incluyen losetas refractarias en el sistema de protección térmica diseñado por Boeing y compuestos de carbono-carbono.

Corrosión La mayoría de los metales y polímeros reaccionan con el oxígeno u otros gases, en particular a temperaturas elevadas. Los metales y las cerámicas pueden desintegrarse y los polímeros y las cerámicas sin óxido pueden oxidarse. Los materiales también son atacados por líquidos corrosivos, lo que conduce a la falla prematura. El ingeniero se enfrenta al reto de seleccionar materiales o recubrimientos que prevengan estas reacciones y permitan la operación en entornos extremos. En aplicaciones espaciales es posible tener que considerar el efecto de la radiación.

Fatiga En muchas aplicaciones, los componentes deben diseñarse de tal manera que la carga sobre el material no pueda ser suficiente como para ocasionar una deformación permanente. Cuando se carga y descarga el material miles de veces, incluso a cargas bajas, pueden comenzar a presentarse pequeñas fisuras y el material falla a medida que estas fisuras crecen. A esto se le conoce como **falla por fatiga**. Al diseñar componentes de soporte de carga, debe tenerse en cuenta la posibilidad de fatiga.

Velocidad de deformación Usted como muchas personas puede conocer el hecho de que la Silly Putty®, un plástico basado en silicón (no en silicio), puede estirarse de manera significativa si se jala de manera lenta (velocidad de deformación pequeña). Si lo jala rápido (velocidad de deformación alta) se parte en dos. Puede ocurrir un comportamiento similar con muchos materiales metálicos. Por tanto, en muchas aplicaciones, debe considerarse el nivel y la velocidad de deformación.

En muchos casos, los efectos de la temperatura, la fatiga, el esfuerzo y la corrosión pueden interrelacionarse y otros efectos externos pudieran afectar el desempeño del material.

1-6 Diseño y selección de materiales

Cuando se diseña un material para una aplicación dada, deben considerarse varios factores. El material debe adquirir las **propiedades físicas y mecánicas** deseadas, debe ser capaz de ser procesado o fabricado en la forma deseada y debe proveer una solución económica al problema de diseño. La satisfacción de estos requerimientos de una manera que proteja al ambiente —quizás promoviendo el reciclaje de los materiales— también es esencial. Al cumplir estos requerimientos de diseño, el ingeniero puede tener que hacer un número de compensaciones para poder generar un producto útil, pero comercial.

Como ejemplo, el costo del material por lo general se calcula con base en el costo por libra. Se debe considerar la **densidad** del material, o su peso por unidad de volumen, en el diseño y selección (tabla 1-2). El aluminio puede costar más que el acero con base en su peso, pero sólo tiene un tercio de la densidad del acero. Aunque las partes hechas de aluminio pueden tener que engrosarse, la parte de aluminio puede ser menos costosa que una hecha de acero debido a la diferencia de peso.

En algunos casos, particularmente en aplicaciones aeroespaciales, el peso es crítico, dado que el peso adicional del vehículo aumenta el consumo de combustible. Mediante el uso de materiales que sean ligeros pero muy resistentes, pueden diseñarse vehículos aeroespaciales o automóviles para mejorar el rendimiento del combustible. Muchos vehículos aeroespaciales avanzados utilizan materiales compuestos en vez de aluminio. Estos compuestos, como el carbono-epoxi, son más costosos que las aleaciones de aluminio tradicionales; sin embargo, el ahorro de combustible generado por la razón resistencia-peso más alta del compuesto (tabla 1-2) puede compensar el costo inicial mayor de la aeronave. Existen literalmente miles de aplicaciones en las que se tienen en cuenta consideraciones similares. Por lo regular la selección de materiales involucra compensaciones entre muchas propiedades.

En este punto de la explicación, se espera que pueda apreciar que las propiedades de los materiales no sólo dependen de la composición, sino también de cómo se preparan los materiales (síntesis y procesamiento) y, más importante, de su estructura interna. Esto explica por qué no es una buena idea para un ingeniero consultar un manual y seleccionar un material para una aplicación dada. Los manuales pueden ser un buen punto de inicio. Un buen inge-

TABLA 1-2 ■ Razones resistencia a peso de varios materiales

Material	Resistencia (lb/pulg ²)	Densidad (lb/pulg ³)	Razón resistencia a peso (pulg)
Polietileno	1 000	0.030	0.03×10^6
Aluminio puro	6 500	0.098	0.07×10^6
Al ₂ O ₃	30 000	0.114	0.26×10^6
Epoxi	15 000	0.050	0.30×10^6
Acero de aleación tratada de manera térmica	240 000	0.280	0.86×10^6
Aleación de aluminio tratada de manera térmica	86 000	0.098	0.88×10^6
Compuesto de carbono-carbono	60 000	0.065	0.92×10^6
Aleación de titanio tratada de manera térmica	170 000	0.160	1.06×10^6
Compuesto de kevlar-epoxi	65 000	0.050	1.30×10^6
Compuesto de carbono-epoxi	80 000	0.050	1.60×10^6

niero considerará: los efectos de cómo se hizo el material, la composición exacta del material candidato para la aplicación que se está pretendiendo, cualquier procesamiento que pueda tener que realizarse para moldear el material o para fabricar un componente, la estructura del material después del procesamiento en un componente o dispositivo, el entorno en el que se utilizará el material y la razón costo a desempeño.

Anteriormente en este capítulo, se ha explicado la necesidad de que conozca los principios de la ciencia e ingeniería de materiales. Si es usted un ingeniero y necesita decidir qué materiales elegirá para fabricar un componente, el conocimiento de los principios de la ciencia e ingeniería de materiales lo capacitará en los conceptos fundamentales. Esto le permitirá tomar buenas decisiones técnicas en el diseño con materiales de ingeniería.

Resumen

- La ciencia e ingeniería de materiales (CIM) es un campo interdisciplinario que trata con la invención de nuevos materiales y dispositivos y la mejora de materiales conocidos con anterioridad con el fin de obtener una comprensión más profunda de las relaciones microestructura-composición-síntesis-procesamiento.
- Los materiales de ingeniería son materiales diseñados y fabricados considerando los principios de la CIM.
- Las propiedades de los materiales de ingeniería dependen de su composición, estructura, síntesis y procesamiento. Un índice de desempeño importante para los materiales o dispositivos es su razón desempeño a costo.
- La estructura de un material se refiere al arreglo de los átomos o iones en el material.
- A la estructura a nivel microscópico se le conoce como microestructura.
- Muchas propiedades de los materiales dependen en gran medida de la estructura, aun si la composición del material permanece igual. Esto explica por qué las relaciones estructura-propiedad o microestructura-propiedad en los materiales son importantes en extremo.
- Los materiales se clasifican como metales y aleaciones, cerámicas, vidrios y vidrios-cerámicos, compuestos, polímeros y semiconductores.
- Los metales y las aleaciones tienen buena resistencia, buena ductilidad y buena formabilidad. Los metales tienen buena conductividad eléctrica y térmica. Los metales y las aleaciones desempeñan una función indispensable en muchas aplicaciones como en automóviles, construcciones, puentes, materiales aeroespaciales y similares.
- Las cerámicas son materiales inorgánicos cristalinos. Son resistentes, sirven como buenos aislantes eléctricos y térmicos, con frecuencia son resistentes al daño por altas temperaturas y entornos corrosivos, pero son mecánicamente quebradizos. Las cerámicas modernas conforman los fundamentos de muchas tecnologías microelectrónicas y fotónicas.
- Los vidrios son sólidos inorgánicos amorfos que por lo regular se derivan de un líquido fundido. Los vidrios pueden templarse para incrementar su resistencia. Los vidrios-cerámicos se forman recociendo los vidrios para nuclear cristales pequeños que mejoran la resistencia a la fractura y al impacto térmico.
- Los polímeros tienen resistencias relativamente bajas; sin embargo, la razón resistencia a peso es muy favorable. Los polímeros no son adecuados para su uso a altas temperaturas. Tienen muy buena resistencia a la corrosión y —como las cerámicas— proveen buen aislamiento eléctrico y térmico. Los polímeros pueden ser dúctiles o quebradizos, dependiendo de la estructura, temperatura y velocidad de deformación.
- Los semiconductores poseen propiedades eléctricas y ópticas únicas que los hacen esenciales para la fabricación de componentes en dispositivos electrónicos y de comunicación.

- Los compuestos se fabrican a partir de distintos tipos de materiales. Proveen combinaciones únicas de propiedades mecánicas y físicas que no pueden encontrarse en un solo material.
- La clasificación funcional de los materiales incluye los materiales aeroespaciales, biomédicos, electrónicos, de energía y ambientales, magnéticos, ópticos (fotónicos) y estructurales.
- Los materiales también pueden clasificarse como cristalinos o amorfos. Los materiales cristalinos pueden ser monocristales o policristalinos.
- Las propiedades de los materiales pueden depender de la temperatura, nivel y tipo de esfuerzo aplicado, velocidad de deformación, oxidación y corrosión y otros factores ambientales.
- La selección de un material que tenga las propiedades y el potencial necesarios para transformarse de manera económica y segura en un producto útil es un proceso complicado que requiere el conocimiento de las relaciones estructura-propiedad-procesamiento-composición.

Glosario

Aleación Material metálico que se obtiene por medio de la combinación química de distintos elementos (por ejemplo, el acero se fabrica a partir de hierro y carbono). Por lo regular, las aleaciones tienen mejores propiedades mecánicas que los metales puros.

Cerámicas Grupo de materiales inorgánicos cristalinos que se caracterizan por una buena resistencia, especialmente a la compresión y altas temperaturas de fusión. Muchas cerámicas tienen muy buen comportamiento de aislación eléctrica y térmica.

Ciencia de materiales Campo de la ciencia que estudia con énfasis las relaciones entre la microestructura, la síntesis y el procesamiento y las propiedades de los materiales.

Ciencia e ingeniería de materiales (CIM) Campo interdisciplinario que trata con la invención de nuevos materiales y la mejora de materiales conocidos con anterioridad a fin de lograr una comprensión más profunda de las relaciones microestructura-composición-síntesis-procesamiento entre distintos materiales.

Composición Constitución química de un material.

Compuestos Grupo de materiales formados a partir de mezclas de metales, cerámicas o polímeros de tal manera que se obtienen combinaciones de propiedades inusuales (por ejemplo, las fibras de vidrio).

Monocristal Material cristalino que está conformado por un solo cristal (no hay límites del grano).

Densidad Masa por unidad de volumen de un material, por lo regular expresada en unidades de g/cm^3 o lb/pulg^3 .

Estructura Descripción de los arreglos de los átomos o iones en un material. La estructura de los materiales tiene una profunda influencia sobre muchas propiedades de los materiales, aun si la composición general no cambia.

Falla por fatiga Falla de un material debido a la carga y descarga repetidas.

Granos Cristales en un material policristalino.

Ingeniería de materiales Campo orientado a la ingeniería que se enfoca en cómo transformar materiales en un dispositivo o estructura útil.

Límites de grano Regiones entre los granos de un material policristalino.

Material cristalino Material compuesto por uno o muchos cristales. En cada cristal, los átomos o iones muestran un arreglo periódico de largo alcance.

Material inteligente Material que puede sentir y responder a estímulos externos tales como el cambio en la temperatura, la aplicación de un esfuerzo o el cambio en humedad o entorno químico.

Material policristalino Material compuesto por muchos cristales (opuesto a un material monocristalino que sólo contiene un cristal).

Metal Elemento que tiene enlazamiento metálico y por lo general buena ductilidad, resistencia y conductividad eléctrica.

Microestructura Estructura de un material a la escala de longitud microscópica.

Plásticos Polímeros que contienen otros aditivos.

Polimerización Proceso por medio del cual las moléculas orgánicas se unen en moléculas gigantes o polímeros.

Polímeros Grupo de materiales que se obtiene por lo regular uniendo moléculas orgánicas en cadenas o redes moleculares gigantes. Los polímeros se caracterizan por resistencias bajas, temperaturas de fusión bajas y mala conductividad eléctrica.

Procesamiento Distintas maneras para moldear materiales en componentes útiles o cambiar sus propiedades.

Propiedades físicas Características como el color, la elasticidad, la conductividad eléctrica o térmica, el magnetismo y el comportamiento óptico que por lo general no son influenciados de manera significativa por las fuerzas que actúan sobre el material.

Propiedades mecánicas Propiedades de un material, como la resistencia, que describen qué tan bien soporta las fuerzas aplicadas un material, incluyendo las fuerzas de tensión y compresión, las fuerzas de impacto, las fuerzas cíclicas o de fatiga o las fuerzas a altas temperaturas.

Razón resistencia a peso Resistencia de un material dividida entre su densidad; los materiales con una razón resistencia a peso alta son resistentes pero ligeros.

Semiconductores Grupo de materiales que poseen una conductividad eléctrica entre la de los metales y las cerámicas comunes (por ejemplo, Si, GaAs).

Síntesis Proceso por medio del cual se preparan materiales a partir de materiales naturales u otras sustancias químicas.

Termoestables Grupo especial de polímeros que se descomponen en vez de fundirse al calentarse. Por lo general son bastante quebradizos debido a que tienen una estructura de red tridimensional relativamente rígida (por ejemplo, el poliuretano).

Termoplásticos Grupo especial de polímeros en los que las cadenas moleculares están enredadas pero no interconectadas. Pueden fundirse con facilidad y adquirir formas útiles. Por lo general, estos polímeros tienen una estructura como la de una cadena (por ejemplo, el polietileno).

Tetraedro de la ciencia e ingeniería de materiales Diagrama tetraédrico que muestra cómo la razón desempeño a costo de los materiales depende de la composición, la microestructura, la síntesis y el procesamiento.

Vidrio Material amorfo derivado del estado fundido, por lo general, pero no siempre, basado en sílice.

Vidrios-cerámicos Clase especial de materiales obtenidos por la formación de un vidrio y después tratándolo de manera térmica para formar cristales pequeños.

Problemas

Sección 1-1 ¿Qué es la ciencia e ingeniería de materiales?

- 1-1** Defina ciencia e ingeniería de materiales (CIM).
- 1-2** Defina los siguientes términos: a) composición, b) estructura, c) síntesis, d) procesamiento y e) microestructura.
- 1-3** Explique la diferencia entre los términos ciencia de materiales e ingeniería de materiales.

Sección 1-2 Clasificación de los materiales

Sección 1-3 Clasificación funcional de los materiales

Sección 1-4 Clasificación de los materiales con base en su estructura

Sección 1-5 Efectos ambientales y diversos

- 1-4** Para cada una de las siguientes clases de materiales dé dos ejemplos *específicos* que sean parte regular de su vida:
 - a) metales;
 - b) cerámicas;
 - c) polímeros, y
 - d) semiconductores.

Especifique el objeto en el que se encuentra cada material y explique por qué el material se utiliza en cada aplicación específica. *Sugerencia:*

Una respuesta de ejemplo para el inciso a) sería que el aluminio es un metal utilizado en la base de algunas ollas y sartenes para generar una distribución uniforme del calor. También es un metal ligero que es útil en utensilios de cocina. Observe que en esta respuesta parcial para el inciso a), se describe un metal específico para una aplicación específica.

1-5 Describa la propiedad de aporte de los materiales siguientes y por qué lo es:

- a) losetas de sílice para transbordadores espaciales;
- b) acero para vigas I en los rascacielos;
- c) aleación de cobalto-cromo-molibdeno para implantes de cadera;
- d) policarbonato para lentes de anteojos, y
- e) bronce para esculturas.

1-6 Describa la propiedad de aporte de los materiales siguientes y por qué lo es:

- a) aluminio para fuselajes de aviones;
- b) poliuretano para alineadores de dientes (aparatos de ortodoncia invisibles);
- c) acero para cojinetes de bolas en un cubo de rueda de una bicicleta;
- d) tereftalato de polietileno para botellas de agua, y
- e) vidrio para botellas de vino.

1-7 Escriba un párrafo acerca de por qué el silicio monocristalino es en la actualidad el material de elección para aplicaciones microelectrónicas. Escriba un segundo párrafo acerca de las alternativas potenciales para el silicio monocristalino para aplicaciones de celdas solares. Provea una lista de las referencias o sitios web que utilice. Debe utilizar al menos tres referencias.

1-8 El acero con frecuencia se recubre con una capa delgada de zinc si se va a utilizar en el exterior. ¿Qué características piensa que provee el zinc a este acero recubierto, o galvanizado? ¿Qué precauciones deben considerarse en la producción de este producto? ¿Cómo se verá afectado el reciclado del producto?

1-9 Se desea producir una cubierta corrediza transparente para un avión. Si se utilizara una cubierta corrediza de vidrio de ventana tradicional, las rocas o aves podrían ocasionar que se haga añicos. Diseñe un material que minimice el daño o que al menos evite que la cubierta corrediza se rompa en pedazos.

1-10 Los resortes helicoidales deben ser muy resistentes y rígidos. El Si_3N_4 es un material resistente y rígido. ¿Seleccionaría este material para un resorte? Explique.

1-11 Los indicadores de temperatura en ocasiones se producen a partir de una tira de metal enrollada que se desenrolla una cantidad específica cuando aumenta la temperatura. ¿Cómo funciona; a partir de qué tipo de material se haría el indicador y cuáles son las propiedades importantes que debe poseer el material en el indicador?

1-12 Desea diseñar un avión que puede volar con energía humana sin detenerse por una distancia de 30 km. ¿Qué tipos de propiedades materiales recomendaría? ¿Qué materiales podrían ser apropiados?

1-13 Desea poner en órbita un microsatélite de 3 pies de diámetro. El satélite contendrá equipo electrónico delicado que enviará y recibirá señales de radio desde la Tierra. Diseñe la coraza externa dentro de la cual estará contenido el equipo electrónico. ¿Qué propiedades requerirá y qué tipo de materiales podrían considerarse?

1-14 ¿Qué propiedades debe poseer la cabeza de un martillo de carpintero? ¿Cómo fabricaría una cabeza de martillo?

1-15 El casco del transbordador espacial consiste en losetas cerámicas unidas a una cubierta de aluminio. Explique los requerimientos del diseño del casco del transbordador que conduce al uso de esta combinación de materiales. ¿Qué problemas en la producción de este casco podrían tener que enfrentar los diseñadores y los fabricantes?

1-16 Desea seleccionar un material para los contactos eléctricos en un dispositivo de conmutación eléctrica que se abre y cierra con frecuencia y a la fuerza. ¿Qué propiedades debe poseer el material del contacto? ¿Qué tipo de material podría recomendar? ¿Sería el Al_2O_3 una buena elección? Explique.

1-17 El aluminio tiene una densidad de 2.7 g/cm^3 . Suponga que desea producir un material compuesto basado en aluminio que tenga una densidad de 1.5 g/cm^3 . Diseñe un material que tenga esta densidad. ¿La introducción de gránulos de polietileno, con una densidad de 0.95 g/cm^3 , en el aluminio sería una posibilidad? Explique.

- 1-18** Desearía ser capaz de identificar distintos materiales sin recurrir al análisis químico o a procedimientos de pruebas extensos. Describa algunas técnicas de prueba y clasificación posibles que podría utilizar con base en las propiedades físicas de los materiales.
- 1-19** Desea ser capaz de separar de manera física distintos materiales en una planta de reciclaje de desechos. Describa algunos métodos posibles que podrían utilizarse para separar entre sí materiales como polímeros, aleaciones de aluminio y aceros.
- 1-20** Podrían producirse algunos pistones para motores de automóviles a partir de un material compuesto que contenga partículas pequeñas y duras de carburo de silicio en una matriz de aleación de aluminio. Explique qué beneficios pueden proveer a la parte en general cada uno de los materiales en el compuesto. ¿Qué problemas podrían ocasionar las distintas propiedades de los dos materiales en la producción de la parte?
- 1-21** Investigue los orígenes y las aplicaciones para un material que ha sido inventado o descubierto desde que usted nació o investigue el desarrollo de un producto o tecnología que haya sido inventada desde su nacimiento que fue hecha posible por el uso de un material nuevo. Escriba un párrafo acerca de este material o producto. Provea una lista de las referencias o sitios web que utilice. Debe utilizar al menos tres referencias.

Knovel® Problemas

Todos los problemas en la sección final de cada capítulo requieren el uso del sitio web de Knovel (<http://www.knovel.com/web/portal/browse>). Estos tres

problemas están diseñados para proveer una introducción a Knovel, su sitio web, y las herramientas interactivas disponibles en él. Para una introducción detallada que describa el uso de Knovel, visite por favor el sitio web del libro en <http://www.cengage.com/engineering/askeland> y vaya al sitio del Student Companion.

K1-1 • Convierta $7\,750\text{ kg/m}^3$ a lb/pies^3 utilizando el Convertidor de unidades.

- Utilizando la tabla periódica, determine el peso atómico del magnesio.

- ¿Cuál es el nombre de la sección 4 en *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (séptima edición)?

- Encuentre el título de un libro que abarque los fundamentos de la química además de contener tablas interactivas de información química.

K1-2 • Utilizando la opción de búsqueda básica en Knovel, encuentre toda la información física y termodinámica asociada con el nitrato de amonio que sea posible. ¿Qué aplicaciones tiene esta sustancia química?

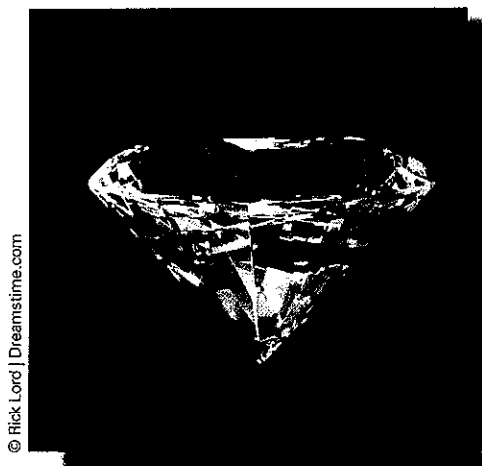
- Utilizando la búsqueda básica, encuentre la fórmula para determinar el volumen de una esfera y un cilindro.

- Utilizando la búsqueda de información, produzca una lista de cinco sustancias químicas con un punto de ebullición entre 300 y 400 K.

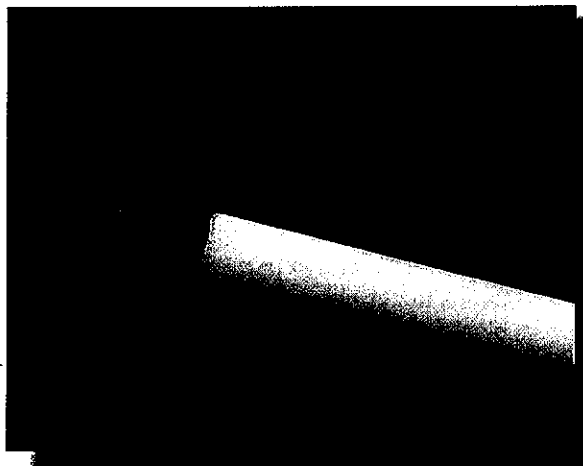
K1-3 • Utilizando el graficador de ecuaciones, determine la entalpía de vaporización del ácido acético puro a 360 K.

- ¿Cuál es la presión (en atm) del aire a una temperatura de $200\text{ }^{\circ}\text{F}$ y un contenido de agua de $10^{-2}\text{ lb de agua/lb de aire}$?

- Encuentre tres grados de polímeros con un punto de fusión mayor a $325\text{ }^{\circ}\text{C}$.



© Rick Lord | Dreamstime.com



© Michalbe | Dreamstime.com

El diamante y el grafito consisten en carbono puro, pero sus propiedades materiales varían de manera considerable. Estas particularidades surgen de las diferencias en los arreglos de los átomos en los sólidos y de las diferencias en el enlazamiento entre los átomos. El enlace covalente en el diamante conduce a resistencia y rigidez altas, una conductividad térmica excelente y una conductividad eléctrica deficiente. Los átomos en el grafito están arreglados en hojas. Dentro de las hojas, el enlace entre los átomos es covalente, pero entre las hojas, los enlaces son menos fuertes. Por tanto el grafito puede cortarse en hojas con facilidad como ocurre cuando se escribe con un lápiz. La conductividad térmica del grafito es mucho menor que la del diamante y su conductividad eléctrica es mucho mayor.

Estructura atómica

¿Se ha preguntado alguna vez?

- ¿Qué es la nanotecnología?
- ¿Por qué el carbono, en forma de diamante, es uno de los materiales más duros conocidos, pero como grafito es muy blando y puede utilizarse como lubricante sólido?
- ¿Por qué la sílice, la cual constituye la sustancia química principal en la arena de playa, se utiliza en forma ultrapura para fabricar fibras ópticas?

Los científicos e ingenieros de materiales han desarrollado un conjunto de instrumentos para caracterizar la **estructura** de los materiales a varias escalas de longitud. Es posible examinar y describir la estructura de los materiales en cinco niveles distintos:

1. estructura atómica;
2. arreglos atómicos de corto y largo alcance;
3. nanoestructura;
4. microestructura; y
5. macroestructura.

Las características de la estructura en cada uno de estos niveles pueden tener influencias distintivas y profundas sobre las propiedades y el comportamiento de un material.

El objetivo de este capítulo es examinar la **estructura atómica** (el núcleo que consiste en protones y neutrones y los electrones que rodean el núcleo) a fin de tener una base para comprender cómo afecta la estructura atómica las propiedades, el comportamiento y las aplicaciones resultantes de los materiales de ingeniería. Se estudiará que la estructura de los átomos afecta los tipos de enlaces que mantienen unidos los materiales entre sí. Estos distintos tipos de enlaces afectan la idoneidad de los materiales para las aplicaciones de ingeniería en el mundo real. El diámetro de los átomos por lo regular se mide utilizando la unidad angstrom ($\text{\AA}$ o 10^{-10} m).

También es importante comprender cómo la estructura atómica y el enlace conducen a distintos arreglos atómicos o iónicos en los materiales. El análisis minucioso del arreglo atómico permite distinguir entre materiales que son **amorfos** (aquellos que carecen de un ordenamiento de largo alcance de átomos o iones) o **cristalinos** (aquellos que exhiben arreglos periódicos de átomos o iones). Los materiales amorfos sólo tienen **arreglos atómicos de corto alcance** mientras que los materiales cristalinos tienen **arreglos de corto y largo alcance**. En los arreglos atómicos de corto alcance, los átomos o iones sólo muestran un orden particular en distancias relativamente cortas (de 1 a 10 Å). Para los materiales cristalinos, el orden atómico de largo alcance está en la forma de átomos o iones arreglados en un patrón tridimensional que se repite sobre distancias mucho más grandes (de ~10 nm a cm).

La ciencia e ingeniería de materiales está en la vanguardia de la **nanociencia** y la **nanotecnología**. La nanociencia es el estudio de los materiales a la escala de longitud nanométrica y la nanotecnología es la manipulación y el desarrollo de dispositivos a la escala de longitud nanométrica. La **nanoestructura** es la estructura de un material a una **escala de longitud** de 1 a 100 nm. El control de la nanoestructura se está volviendo incrementalmente importante para las aplicaciones de ingeniería con materiales avanzados.

La **microestructura** es la estructura de los materiales a una **escala de longitud** de 100 a 100 000 nm o 0.1 a 100 micrómetros (con frecuencia escritos como μm). La microestructura se refiere por lo regular a características como el tamaño del grano de un material cristalino y otras relacionadas con los defectos en los materiales. (Un **grano** es un monocristal en un material compuesto de muchos cristales.)

La **macroestructura** es la estructura de un material a nivel macroscópico donde la escala de longitud es $>100 \mu\text{m}$. Las características que constituyen la macroestructura incluyen la porosidad, los recubrimientos de la superficie y las microfisuras internas y externas.

El capítulo concluye considerando algunos de los **alótropos** del carbono. Se verá que, aunque el diamante y el grafito están hechos a partir de carbono puro, tienen propiedades materiales distintas. La clave para comprender estas diferencias es comprender cómo se arreglan los átomos en cada alótropo.

2-1 Estructura de materiales: relevancia tecnológica

En el mundo actual, la tecnología de la información (TI), la biotecnología, la tecnología energética, la tecnología ambiental y varias otras áreas requieren dispositivos más pequeños, ligeros, rápidos, portátiles, eficientes, confiables, duraderos y económicos. Se desean baterías que sean más pequeñas, ligeras y de mayor duración. Se necesitan automóviles que sean relativamente asequibles, ligeros, seguros, con alto rendimiento de combustible y “llenos” de varias características avanzadas, que van de sistemas de posicionamiento global (GPS) a sensores sofisticados para la apertura de bolsas de aire.

Algunas de estas necesidades han generado un interés considerable en la nanotecnología y en **sistemas microelectromecánicos** (SMEM). Como ejemplo del mundo real de la tecnología de los SMEM, considere un sensor de un acelerómetro pequeño obtenido por medio del micromaquinado del silicio (Si). Este sensor se utiliza para medir la aceleración en automóviles. La información es procesada por una computadora central y después se utiliza para controlar la apertura de las bolsas de aire. Las propiedades y el comportamiento de los materiales a estos niveles “micro” pueden variar en gran medida cuando se comparan con aquellos en su estado “macro” o voluminoso. Como resultado, la comprensión de la nanoestructura y de la microestructura son áreas que han recibido una atención considerable.

Las aplicaciones mostradas en la tabla 2-1 y en las figuras acompañantes (figuras 2-1 a 2-6) ilustran cuán importante son para el comportamiento de los materiales los distintos niveles de la estructura. Las aplicaciones ilustradas están divididas por medio de sus niveles de estructura y de sus escalas de longitud (la longitud característica aproximada que es importante para una aplicación dada). También se proveen ejemplos de cómo se utilizaría tal aplicación dentro de la industria, al igual que una ilustración.

TABLA 2-1 ■ Niveles de la estructura

Nivel de la estructura	Ejemplo de tecnologías
Estructura atómica ($\sim 10^{-10}$ m o 1 Å)	<i>Diamante:</i> El diamante está basado en enlaces covalentes carbono-carbono (C-C). Se espera que los materiales con este tipo de enlazamiento sean relativamente duros. Se utilizan películas delgadas de diamantes para proveer un filo resistente al desgaste en las herramientas de corte.

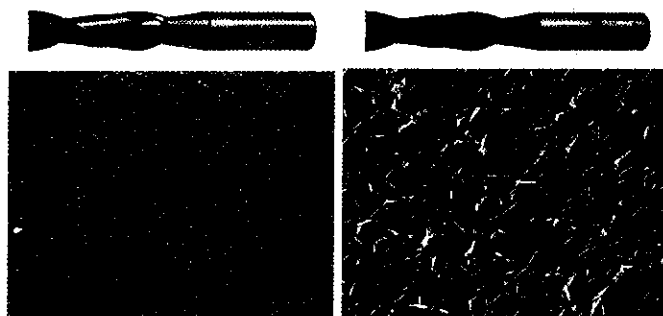


Figura 2-1 Herramientas de corte recubiertas con diamante. (Cortesía de OSG Tap & Die, Inc.)

Arreglos atómicos:
orden de largo alcance
(OLA) (~ 10 nm a cm)

Titanato de zirconio de plomo [$Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$] o PZT: Cuando los iones en este material se acomodan de tal manera que exhiben estructuras cristalinas tetragonales y/o romboédricas, el material es piezoeléctrico (es decir, desarrolla un voltaje cuando se somete a una presión o a un esfuerzo). Las cerámicas PZT se utilizan ampliamente en varias aplicaciones incluyendo encendedores de gas, generación de ultrasonidos y control de vibración.

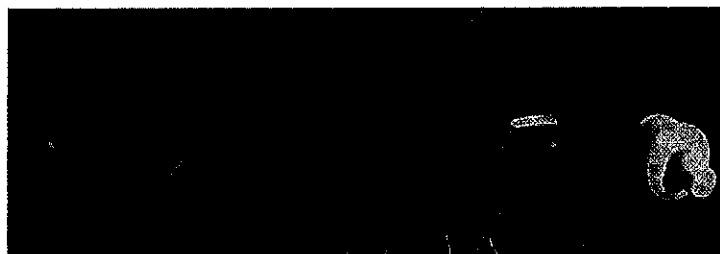
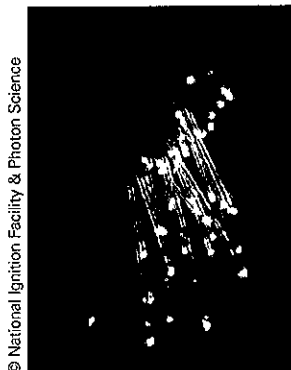


Figura 2-2 Encendedores de gas piezoeléctricos basados en PZT. Cuando se somete a un esfuerzo el material piezoeléctrico (aplicando una presión), se desarrolla un voltaje y se crea una chispa entre los electrodos. (Cortesía de Morgan Electro Ceramics, Ltd. RU.)

TABLA 2-1 ■ (Continuación)

Nivel de la estructura	Ejemplo de tecnologías
Arreglos atómicos: orden de corto alcance (OCA) (1 a 10 Å)	Los iones en vidrios basados en sílice (SiO_2) sólo exhiben un orden de corto alcance en el que los iones Si^{+4} y O^{-2} están acomodados de una manera en particular (cada Si^{+4} está enlazado con 4 iones O^{-2} en una coordinación tetraédrica, con cada ion O^{-2} compartido por dos tetraedros). Sin embargo, este orden no se mantiene en distancias largas, por tanto hace amorfos los vidrios basados en sílice. Los vidrios amorfos basados en sílice y ciertos otros óxidos forman la base para toda la industria de comunicaciones por fibra óptica.



© National Ignition Facility & Photon Science

Figura 2-3

Fibras ópticas basadas en una forma de la sílice que es amorfa.

Nanoestructura
($\sim 10^{-9}$ a 10^{-7} m,
1 a 100 nm)

Las partículas de nanotamaño (~ 5 -10 nm) de óxido de hierro se utilizan en ferrofluidos o imanes líquidos. Una aplicación de estos imanes líquidos es como medio de refrigeración (transferencia de calor) para altavoces.



Figura 2-4

Ferrofluido. (Cortesía de Ferro Tec, Inc.)

Microestructura
($\sim 10^{-7}$ a 10^{-4} m,
0.1 a 100 μm)

La resistencia mecánica de muchos metales y aleaciones depende en gran medida del tamaño del grano. Los granos y los límites de los granos en esta micrografía acompañante del acero son parte de las características microestructurales de este material cristalino. En general, a temperatura ambiente un tamaño del grano más fino conduce a una resistencia mayor. Muchas propiedades importantes de los materiales son sensibles a la microestructura.

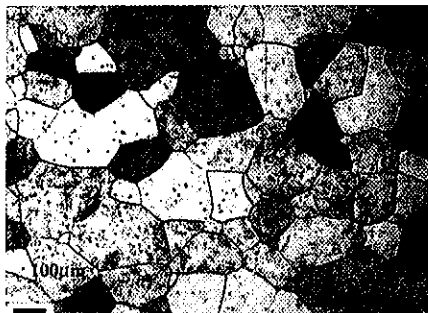


Figura 2-5

Micrografía del acero inoxidable que muestra los granos y los límites de los granos. (Cortesía de los doctores A. J. Deardo, M. Hua y J. García.)

TABLA 2-1 ■ (Continuación)

Nivel de la estructura	Ejemplo de tecnologías
Macroestructura ($\sim > 10^{-4}$ m, $\sim > 100\,000$ nm o $100\ \mu\text{m}$)	Los recubrimientos relativamente gruesos, como las pinturas en los automóviles y otras aplicaciones, no sólo se utilizan por estética, también proveen resistencia a la corrosión.



Figura 2-6
Varios recubrimientos orgánicos e inorgánicos protegen contra la corrosión a los automóviles y proveen una apariencia agradable. (Cortesía de Lexus, una división de Toyota Motor Sales, U.S.A., Inc.)

Ahora se pondrá atención a los detalles que conciernen a la estructura de los átomos, el enlace entre átomos y cómo éstos forman la base para las propiedades de los materiales. La estructura atómica influye en cómo se enlazan los átomos entre sí. Una comprensión de esto ayuda a categorizar a los materiales como metales, semiconductores, cerámicas o polímeros. También permite derivar algunas conclusiones preliminares que conciernen a las propiedades mecánicas y a los comportamientos físicos de estas cuatro clases de materiales.

2-2 Estructura del átomo

Los conceptos mencionados a continuación se cubren en los cursos de química introductorios comunes. Se proporciona un repaso breve. Un átomo está compuesto por un núcleo rodeado por electrones. El núcleo contiene neutrones y protones con carga positiva y tiene una carga neta positiva. Los electrones con carga negativa se mantienen alrededor del núcleo por medio de una atracción electrostática. La carga eléctrica q que tiene cada electrón y protón es de 1.60×10^{-19} coulombs (C).

El **número atómico** de un elemento es igual al número de protones en cada átomo. Por tanto, un átomo de hierro, el cual contiene 26 protones, tiene un número atómico de 26. El átomo como un todo es eléctricamente neutro debido a que el número de protones y electrones es igual.

La mayor parte de la masa del átomo está contenida dentro del núcleo. La masa de cada protón y neutrón es de 1.67×10^{-24} g, pero la masa de cada electrón es de sólo 9.11×10^{-28} g. La **masa atómica** M , la cual es igual a la masa total del número promedio de protones y neutrones en el átomo en unidades de masa atómica, también es la masa en gramos de la **constante de Avogadro** N_A de átomos. La cantidad $N_A = 6.022 \times 10^{23}$ átomos/mol es el número de átomos o moléculas en un mol. Por tanto, la masa atómica tiene unidades de g/mol. La **unidad de masa atómica**, o uma, es una unidad alterna para la masa atómica, la cual es 1/12 la masa del carbono 12 (es decir, el átomo de carbono con 12 **nucleones**, seis protones y seis neutrones). Como ejemplo, un mol de hierro contiene 6.022×10^{23} átomos y tiene una masa de 55.847 g o 55.847 uma. Los cálculos que incluyen la masa atómica de un material y la constante de Avogadro son útiles para comprender más acerca de la estructura de un material. El ejemplo 2-1 ilustra cómo calcular el número de átomos para la plata, un metal y un buen conductor eléctrico. El ejemplo 2-2 ilustra una aplicación para los materiales magnéticos.

Ejemplo 2-1*Calcule el número de átomos en 100 g de plata*

Calcule el número de átomos en 100 g de plata (Ag).

SOLUCIÓN

El número de átomos puede calcularse a partir de la masa atómica y la constante de Avogadro. A partir del apéndice A, la masa atómica, o peso, de la plata es de 107.868 g/mol. El número de átomos es

$$\begin{aligned}\text{Número de átomos de Ag} &= \frac{(100 \text{ g})(6.022 \times 10^{23} \text{ átomos/mol})}{107.868 \text{ g/mol}} \\ &= 5.58 \times 10^{23}.\end{aligned}$$

Ejemplo 2-2*¿Cuántos átomos de hierro-platino (Fe-Pt) hay en una nanopartícula de 10 nm de diámetro?*

Los científicos están considerando utilizar nanopartículas de materiales magnéticos como el hierro-platino (Fe-Pt) como medio para el almacenamiento de información de ultra alta densidad. Los arreglos de tales partículas pueden conducir de manera potencial al almacenamiento de billones de bits de información por pulgada cuadrada, una capacidad que será de 10 a 100 veces mayor que cualquier otro dispositivo como los discos duros de las computadoras. Si estos científicos consideraran partículas de hierro (Fe) que tengan 3 nm de diámetro, ¿cuál será el número de átomos en una de estas partículas?

SOLUCIÓN

En un capítulo posterior sobre materiales magnéticos aprenderá que tales partículas utilizadas en los medios de grabación tienden a ser aciculares (como aguja). Por ahora, suponga que las partículas magnéticas tienen forma esférica.

El radio de una partícula es de 1.5 nm.

$$\begin{aligned}\text{Volumen de cada nanopartícula magnética de hierro} &= (4/3)\pi(1.5 \times 10^{-7} \text{ cm})^3 \\ &= 1.4137 \times 10^{-20} \text{ cm}^3\end{aligned}$$

Densidad del hierro = 7.8 g/cm³. Masa atómica del hierro = 55.847 g/mol.

$$\begin{aligned}\text{Masa de cada nanopartícula de hierro} &= 7.8 \text{ g/cm}^3 \times 1.4137 \times 10^{-20} \text{ cm}^3 \\ &= 1.1027 \times 10^{-19} \text{ g}\end{aligned}$$

Un mol o 55.847 g de Fe contienen 6.022×10^{23} átomos, por tanto, el número de átomos en una nanopartícula de Fe será de 1189. Éste es un número muy pequeño de átomos. Compare éste con el número de átomos en una partícula de hierro que tiene 10 micrómetros de diámetro. Tales partículas de hierro más grandes se utilizan con frecuencia en los cereales para el desayuno, cápsulas de vitaminas y otras aplicaciones.

2-3

Estructura electrónica del átomo

Los electrones ocupan niveles de energía discretos dentro del átomo. Cada electrón posee una energía particular, con no más de dos electrones en cada átomo teniendo la misma energía. Esto también implica que existe una diferencia discreta en energía entre dos niveles de energía cualesquiera. Dado que cada elemento posee un conjunto distinto de estos niveles de energía, las diferencias entre ellos también son únicas. Los niveles de energía y las diferencias entre ellos se conocen con gran precisión para cada elemento, lo que forma la base para varios tipos de **espectroscopia**. Utilizando un método espectroscópico, puede determinarse la identidad de los elementos en una muestra.

Números cuánticos El nivel de energía al que pertenece cada electrón está determinado por cuatro **números cuánticos**. Los cuatro números cuánticos son el número cuántico principal n , el número cuántico acimutal o secundario l , el número cuántico magnético m_l y el número cuántico del espín m_s .

El número cuántico principal refleja el agrupamiento de los electrones en conjuntos de niveles de energía conocidos como capas. Los números cuánticos acimutales describen los niveles de energía dentro de cada capa cuántica y reflejan un agrupamiento posterior de los niveles de energía similares, por lo general llamados orbitales. El número cuántico magnético especifica los orbitales asociados con un número cuántico acimutal particular dentro de cada capa. Por último, al **número cuántico del espín** (m_s) se le asignan valores de $+1/2$ y $-1/2$, lo cual refleja los dos valores posibles del "espín" de un electrón.

De acuerdo con el **principio de exclusión de Pauli**, dentro de cada átomo, dos electrones no pueden tener los mismos cuatro números cuánticos y por tanto, cada electrón está designado por un conjunto único de cuatro números cuánticos. El número de niveles de energía posibles está determinado por los primeros tres números cuánticos.

1. Al número cuántico principal n se le asignan valores enteros 1, 2, 3, 4, 5, ... que se refieren a la capa cuántica a la que pertenece el electrón. Una **capa cuántica** es un *conjunto* de niveles de energía fijos a los que pertenecen los electrones.

A las capas cuánticas también se les asigna una letra: la capa para $n = 1$ se le designa K, para $n = 2$ es L, para $n = 3$ es M y así sucesivamente. Estas designaciones fueron transferidas de la nomenclatura utilizada en la espectroscopia óptica, un conjunto de técnicas anteriores a la comprensión de los niveles electrónicos cuantizados.

2. El número de niveles de energía en *cada* capa cuántica está determinado por el **número cuántico acimutal** l y por el número cuántico magnético m_l . Los números cuánticos acimutales están asignados $l = 0, 1, 2, \dots, n - 1$. Por ejemplo, cuando $n = 2$, hay dos números cuánticos acimutales, $l = 0$ y $l = 1$. Cuando $n = 3$ hay tres números cuánticos acimutales, $l = 0, l = 1$ y $l = 2$. Los números cuánticos acimutales se designan por medio de letras minúsculas; por ejemplo, se habla de los orbitales d :

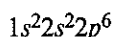
s para $l = 0$ d para $l = 2$

p para $l = 1$ f para $l = 3$

3. El número de valores para el número cuántico magnético m_l da el número de niveles de energía, u orbitales, para cada número cuántico acimutal. El número total de números cuánticos magnéticos para cada l es $2l + 1$. Los valores para m_l están dados por los números enteros entre $-l$ y $+l$. Por ejemplo, si $l = 2$, hay $2(2) + 1 = 5$ números cuánticos magnéticos con valores $-2, -1, 0, +1$ y $+2$. La combinación de l y m_l especifica un orbital particular en una capa.
4. No más de dos electrones con espines electrónicos opuestos ($m_s = +1/2$ y $-1/2$) pueden estar presentes en cada orbital.

Considerando con cuidado los valores numéricos posibles para n , l y m_l , se puede determinar el intervalo de números cuánticos *posibles*. Por ejemplo, en la capa K (esto es, $n = 1$), sólo hay un orbital s (ya que el único valor permitido de l es 0 y m_l es 0). Como resultado, una capa K no puede contener más de dos electrones. Como otro ejemplo, considere una capa M. En este caso $n = 3$, por lo que l toma valores de 0, 1 y 2 (están presentes los orbitales s , p y d). Los valores de m_l reflejan que hay un solo orbital s ($m_l = 0$, un solo valor), tres orbitales p ($m_l = -1, 0, +1$ o tres valores) y cinco orbitales d ($m_l = -2, -1, 0, +1, +2$ o cinco valores discretos).

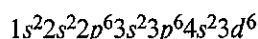
La notación abreviada que se utiliza con frecuencia para indicar la estructura electrónica de un átomo combina el valor numérico del número cuántico principal, la notación de letra minúscula para el número cuántico acimutal y un superíndice que muestra el número de electrones en cada orbital. La notación abreviada para el neón, el cual tiene un número atómico de 10 es:



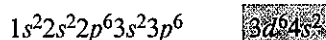
Desviaciones de las estructuras electrónicas esperadas

Los niveles de energía de las capas cuánticas no se llenan en un orden numérico estricto. El **principio de Aufbau** es un mecanismo gráfico que predice las desviaciones del ordenamiento esperado de los niveles de energía. En la figura 2-7 se muestra el principio de Aufbau. Para utilizar este principio, escriba las combinaciones posibles del número cuántico principal y el número cuántico acimutal para cada capa cuántica. Las combinaciones para cada capa cuántica deben escribirse en una sola línea. Cuando el número cuántico principal aumenta en uno, el número de combinaciones cuánticas dentro de cada capa aumenta en uno (es decir, cada renglón es una entrada mayor que el renglón anterior). Dibuje flechas a través de los renglones en una diagonal desde la derecha superior a la izquierda inferior como se muestra en la figura 2-7. Siguiendo las flechas, se predice el orden en el que se llenan los niveles de energía de cada nivel cuántico.

Por ejemplo, de acuerdo con el principio de Aufbau, la estructura electrónica del hierro, número atómico 26, es



De manera convencional, los números cuánticos principales se ordenan del menor al mayor cuando se escribe la estructura electrónica. Por tanto, la estructura electrónica del hierro se escribe



El nivel $3d$ sin llenar (hay cinco orbitales d , por lo que de manera abreviada son posibles d^1 , d^2 , ..., d^{10}) ocasiona el comportamiento magnético del hierro.

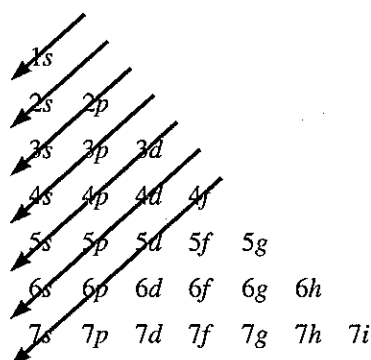
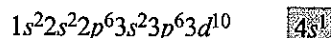


Figura 2-7

Principio de Aufbau. Siguiendo las flechas, se predice el orden en el que se llenan los niveles de energía de cada nivel cuántico: $1s$, $2s$, $2p$, $3s$, $3p$, etc. Observe que las designaciones con letra para $l = 4, 5, 6$ son g, h e i .

Observe que no todos los elementos siguen el principio de Aufbau. Unos cuantos, como el cobre, son las excepciones. De acuerdo con el principio de Aufbau, el cobre debe tener la estructura electrónica $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^9 4s^2$, pero el cobre en realidad tiene la estructura

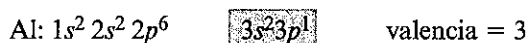


En general, los electrones ocuparán cada orbital de un nivel de energía dado de manera sencilla antes que los orbitales que están doblemente ocupados. Por ejemplo, el nitrógeno tiene la estructura electrónica



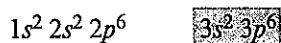
Cada uno de los tres orbitales p en la capa L contiene un electrón en vez de un orbital que contiene dos electrones, uno con un electrón y uno con cero electrones.

Valencia La valencia de un átomo es el número de electrones en un átomo que participan en el enlazamiento o en las reacciones químicas. Por lo general, la valencia es el número de electrones en los niveles de energía externos s y p . La valencia de un átomo está relacionada con la habilidad del átomo de entrar en combinación química con otros elementos. Ejemplos de la valencia son



La valencia también depende del entorno inmediato que rodea al átomo o de los átomos vecinos disponibles para el enlazamiento. El fósforo tiene una valencia de cinco cuando se combina con el oxígeno, pero la valencia del fósforo sólo es de tres, los electrones en el nivel $3p$, cuando reacciona con hidrógeno. ¡El manganeso puede tener una valencia de 2, 3, 4, 6 o 7!

Estabilidad atómica y electronegatividad Si un átomo tiene una valencia de cero, el elemento es inerte (no reactivo). Un ejemplo es el argón (Ar), el cual tiene la estructura electrónica:



Otros átomos prefieren comportarse como si sus niveles externos s y p estuvieran por completo llenos, con ocho electrones, o completamente vacíos. El aluminio tiene tres electrones en sus niveles externos s y p . Un átomo de aluminio puede ceder con facilidad sus tres electrones externos para vaciar los niveles $3s$ y $3p$. El enlazamiento atómico y el comportamiento químico del aluminio están determinados por cómo interactúan estos tres electrones con los átomos circundantes.

Por otro lado, el cloro contiene siete electrones en los niveles externos $3s$ y $3p$. La reactividad del cloro es ocasionada por su deseo de llenar su nivel de energía externo aceptando un electrón.

La **electronegatividad** describe la tendencia de un átomo a ganar un electrón. Los átomos con niveles de energía externos casi llenos por completo, como el cloro, son altamente electronegativos y aceptan electrones con facilidad. Sin embargo, los átomos con niveles externos casi vacíos, tal como el sodio, ceden electrones con facilidad y tienen una electronegatividad baja. Los elementos con número atómico alto también tienen electronegatividad baja debido a que los electrones externos están a una distancia mayor del núcleo positivo, por lo que no están tan atraídos fuertemente al átomo. En la figura 2-8 se muestran las electronegatividades para algunos elementos. Los elementos con una electronegatividad baja (es decir <2.0) en ocasiones se describen como **electropositivos**.

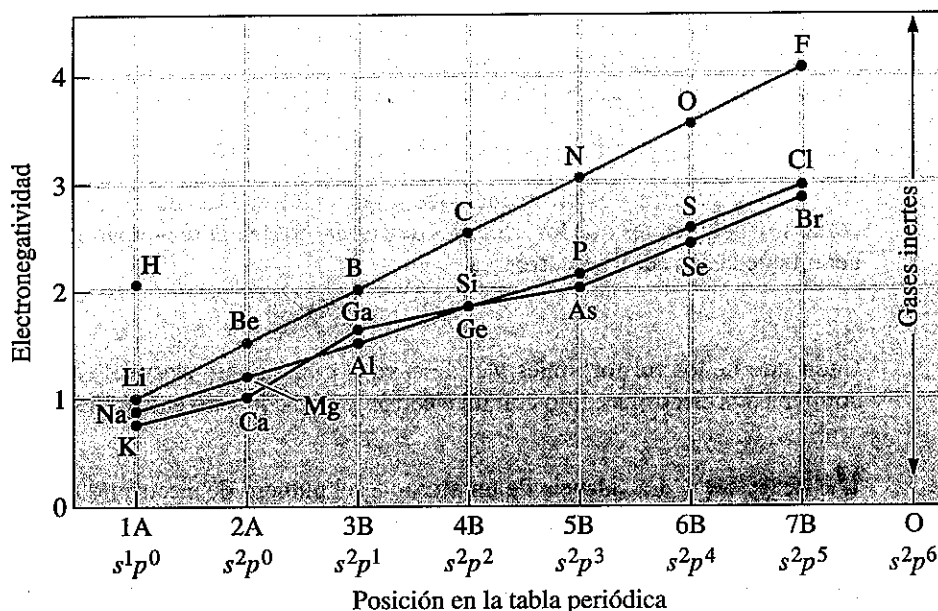


Figura 2-8 Electronegatividades de los elementos seleccionados en relación con la posición de los elementos en la tabla periódica.

2-4 Tabla periódica

La tabla periódica contiene información valiosa acerca de elementos específicos y también puede ayudar a identificar las tendencias en tamaño atómico, punto de fusión, reactividad química y otras propiedades. La tabla periódica familiar (figura 2-9) se construye de acuerdo con la estructura electrónica de los elementos. No todos los elementos en la tabla periódica son de ocurrencia natural. Los periodos (renglones) en la tabla periódica corresponden a las capas cuánticas, o números cuánticos principales. Los grupos (columnas) por lo regular se refieren al número de electrones en los niveles de energía s y p más externos y corresponden a la valencia más común. En la ingeniería, se trata principalmente con:

- Polímeros (plásticos) (basados principalmente en carbono, el cual aparece en el grupo 4B);
- Cerámicas (por lo regular basadas en combinaciones de varios elementos que aparecen en los grupos 1 al 5B y en elementos tales como oxígeno, carbono y nitrógeno), y
- Materiales metálicos (por lo regular basados en elementos en los grupos 1, 2 y en los elementos metálicos de transición).

En el grupo 4B aparecen muchos semiconductores importantes en la tecnología (por ejemplo, el silicio (Si), el diamante (C) y el germanio (Ge)). Los semiconductores también pueden ser combinaciones de elementos de los grupos 2B y 6B (por ejemplo, el seleniuro de cadmio (CdSe), basados en cadmio (Cd) del grupo 2 y basados en selenio (Se) en el grupo 6). Se les conoce como **semiconductores II-VI** (dos-seis). De manera similar, el arseniuro de galio (GaAs) es un **semiconductor III-V** (tres-cinco) basado en galio (Ga) del grupo 3B y arsénico (As) del grupo 5B. Muchos **elementos de transición** (por ejemplo, el titanio (Ti), vanadio (V), hierro (Fe), níquel (Ni), cobalto (Co), etc.) son particularmente útiles para materiales magnéticos y ópticos debido a sus configuraciones electrónicas que les permiten tener múltiples valencias.

1A 2A 3A 4A 5A 6A 7A 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

1 H 1.01 2 He 4.00

3 Li 6.94 4 Be 9.01 5 B 10.81 6 C 12.01 7 N 14.01 8 O 16.00 9 F 18.99 10 Ne 20.18

11 Na 22.99 12 Mg 24.31 13 Al 26.98 14 Si 28.09 15 P 30.97 16 S 32.06 17 Cl 35.45 18 Ar 39.95

19 K 39.10 20 Ca 40.08 21 Sc 44.96 22 Ti 47.88 23 V 50.94 24 Cr 52.00 25 Mn 54.94 26 Fe 55.85 27 Co 58.93 28 Ni 58.69 29 Cu 63.55 30 Zn 65.38 31 Ga 69.72 32 Ge 72.64 33 As 74.92 34 Se 78.96 35 Br 79.90 36 Kr 83.80

37 Rb 85.47 38 Sr 87.62 39 Y 88.91 40 Zr 91.22 41 Nb 92.91 42 Mo 95.94 43 Tc 98.91 44 Ru 101.07 45 Rh 101.07 46 Pd 106.32 47 Ag 107.87 48 Cd 112.41 49 In 114.82 50 Sn 118.71 51 Sb 121.76 52 Te 127.60 53 I 126.91 54 Xe 131.29

55 Cs 132.91 56 Ba 137.33 57 La 138.91 58 Ce 140.12 59 Pr 140.91 60 Nd 144.24 61 Pm 144.91 62 Sm 150.36 63 Eu 151.96 64 Gd 157.25 65 Tb 158.93 66 Dy 162.50 67 Ho 164.93 68 Er 167.26 69 Tm 168.93 70 Yb 173.05 71 Lu 174.97 72 Hf 178.49 73 Ta 180.95 74 W 183.84 75 Re 186.21 76 Os 190.23 77 Ir 192.22 78 Pt 195.08 79 Au 196.97 80 Hg 200.59 81 Tl 204.38 82 Pb 207.20 83 Bi 208.98 84 Po (209) 85 At (210) 86 Rn (222)

73 U 238.03 74 Np 237.05 75 Pu 239.05 76 Am 243.06 77 Cm 247.07 78 Bk 247.07 79 Cf 251.08 80 Es 252.08 81 Fm 257.10 82 Md 258.10 83 No 259.10 84 Lr 262.11 85 Ac 227.03 86 Th 232.04 87 Pa 231.04 88 U 238.03 89 Np 237.05 90 Pu 239.05 91 Am 243.06 92 Cm 247.07 93 Bk 247.07 94 Cf 251.08 95 Es 252.08 96 Fm 257.10 97 Md 258.10 98 No 259.10 99 Lr 262.11

6 Lantánidos

7 Actínidos

Legend:

- Número atómico
- Configuración electrónica
- Punto de fusión [°C]
- Punto de ebullición [°C]
- Masa atómica (relativa media) electrónica
- Estados de oxidación
- Nombre
- Densidad [g/cm³], para gases [g/l] (0°, 1013 mbar)
- Electronegatividad
- Radioactivo

Figura 2-9 Tabla periódica de los elementos.

El orden de los elementos en la tabla periódica y el origen del principio de Aufbau se vuelven aun más claros cuando se insertan en sus posiciones correctas los periodos para las series de lantánidos y actínidos (figura 2-10) en vez de colocarse debajo de la tabla periódica para conservar el espacio. La figura 2-10 indica el orbital particular que se está llenando por cada electrón adicional a medida que incrementa el número atómico. Observe que están indicadas las excepciones para aquellos elementos que no siguen el principio de Aufbau.

Tendencias en las propiedades La tabla periódica contiene una abundancia de información útil (por ejemplo, la masa atómica, el número atómico de distintos elementos, etc.). También señala las tendencias en el tamaño atómico, los puntos de fusión y la reactividad química. Por ejemplo, el carbono (en su forma de diamante) tiene el punto de fusión más alto (3550 °C). Los puntos de fusión de los elementos debajo del carbono disminuyen (por ejemplo, el silicio (Si) (1410 °C), el germanio (Ge) (937 °C), el estaño (Sn) (232 °C) y el plomo (Pb) (327 °C)). Observe que la temperatura de fusión del Pb es mayor que la del Sn. La tabla periódica indica las tendencias y las variaciones no exactas en las propiedades.

Se pueden distinguir tendencias en otras propiedades a partir de la tabla periódica. El diamante es un material con un espacio de banda muy grande (es decir, no es un conductor de electricidad muy efectivo). Esto es consistente con el hecho de que el carbono (en forma de diamante) tiene el punto de fusión más alto entre los elementos del grupo 4B, lo cual sugiere que las fuerzas interatómicas son intensas (vea la sección 2-6). A medida que se desplaza hacia

The periodic table displays elements grouped by their electron configurations. The main body of the table shows elements from Hydrogen (H) to Oganesson (Og). The lanthanide and actinide series are shown as separate rows at the bottom of periods 6 and 7, respectively. The table is organized by periods (1-7) and groups. The orbitals being filled are indicated by the labels above the elements: s, p, d, and f. The lanthanide and actinide series are labeled as 'Metales de transición interna (n-2)f' and 'Metales de transición (n-1)d' respectively.

Figura 2-10 Tabla periódica para la cual los periodos en las series de lantánidos y actínidos están insertadas en las posiciones correctas. El nombre del grupo indica el orbital particular que está siendo llenado por cada electrón adicional a medida que aumenta el número atómico.

abajo del grupo, el espacio de banda disminuye (los espacios de banda de los semiconductores Si y Ge son de 1.11 y 0.67 eV, respectivamente). Desplazándose más hacia abajo en el grupo 4, una forma del estaño es un semiconductor. Otra forma del estaño es metálica. Si se observa el grupo 1A, se ve que el litio es altamente electropositivo (esto es, un elemento cuyos átomos desean participar en interacciones químicas donando electrones y por tanto es altamente reactivo). De manera similar, si se desplaza hacia abajo en el grupo 1A, se puede observar que la reactividad química de los elementos disminuye.

Por tanto, la tabla periódica proporciona información útil acerca de las fórmulas, los números atómicos y las masas atómicas de los elementos. También ayuda a predecir o racionalizar las tendencias en las propiedades de los elementos y compuestos. Esto explica por qué la tabla periódica es de gran utilidad para los científicos y los ingenieros.

2-5 Enlace atómico

Existen cuatro mecanismos importantes por medio de los cuales se enlazan los átomos en los materiales de ingeniería. Éstos son:

1. enlaces metálicos;
2. enlaces covalentes;
3. enlaces iónicos, y
4. enlaces de van der Waals.

Los primeros tres tipos de enlaces son relativamente fuertes y se conocen como **enlaces primarios** (enlaces relativamente fuertes entre átomos adyacentes que resultan de la transferencia o compartición de los electrones orbitales externos). Las fuerzas de van der Waals son enlaces secundarios y se originan a partir de un mecanismo distinto y son relativamente más débiles. Se verá cada uno de estos tipos.

Enlace metálico Los elementos metálicos tienen átomos electropositivos que donan sus electrones de valencia para formar un “mar” de electrones que rodean los átomos (figura 2-11). Por ejemplo, el aluminio cede sus tres electrones de valencia, dejando una parte central que consiste en el núcleo y los electrones internos. Dado que en esta parte central faltan tres electrones con carga negativa, tiene una carga positiva de tres. Los electrones de valencia se mueven con libertad dentro de la infinidad de electrones y se asocian con varias partes centrales de átomos. Las partes centrales de iones con carga positiva se mantienen unidos por medio de la atracción mutua al electrón, por tanto producen un enlace metálico fuerte.

Debido a que sus electrones de valencia no están fijos en una sola posición, la mayoría de los metales puros son buenos conductores de electricidad a temperaturas relativamente bajas ($\sim T < 300\text{ K}$). En la influencia de un voltaje aplicado los electrones de valencia se mueven, ocasionando que fluya una corriente si el circuito está cerrado.

Los metales muestran buena ductilidad dado que los enlaces metálicos son no direccionales. Existen otras razones importantes relacionadas con la microestructura que pueden explicar por qué los metales exhiben en realidad *resistencias más bajas y ductilidad más alta* que lo que puede anticiparse a partir de su enlazamiento. La **ductilidad** se refiere a la habilidad de los materiales a estirarse o flexionarse permanentemente sin romperse. En el capítulo 6 se explicarán con mayor detalle estos conceptos. En general, los puntos de fusión de los metales son relativamente altos. Desde un punto de vista de las propiedades ópticas, los metales son buenos reflectores de la radiación visible. Debido a su carácter electropositivo, varios metales como el hierro tienden a experimentar corrosión u oxidación. Muchos metales puros son buenos conductores de calor y se utilizan de manera efectiva en muchas aplicaciones de transferencia de calor. Es necesario enfatizar que el enlace metálico es *uno de los factores* en los esfuerzos de racionalizar las tendencias observadas con respecto a las propiedades de los

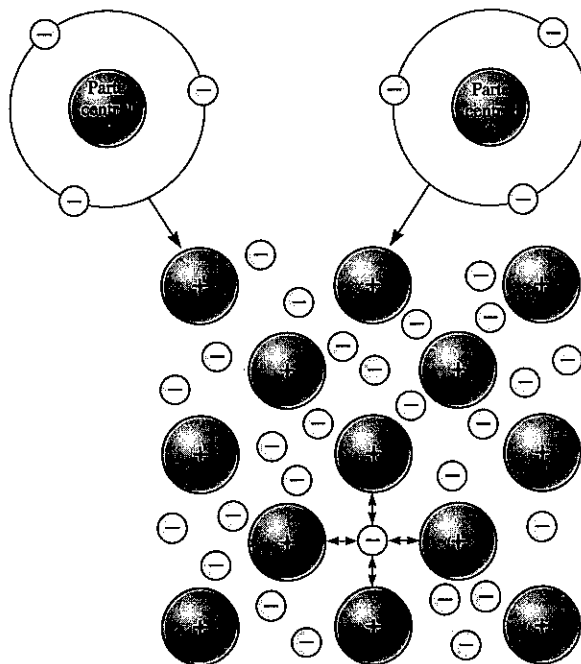


Figura 2-11

Se forma un enlace metálico cuando los átomos ceden sus electrones de valencia, los cuales forman entonces infinidad de electrones. Las partes centrales de átomos con carga positiva se enlazan por medio de la atracción mutua a los electrones con carga negativa.

materiales metálicos. Como se verá en algunos de los siguientes capítulos, existen otros factores relacionados con la microestructura que también desempeñan una función crucial en la determinación de las propiedades de los materiales metálicos.

Enlace covalente Los materiales con **enlazamiento covalente** se caracterizan por enlaces que se forman por medio de la compartición de los electrones de valencia entre dos o más átomos. Por ejemplo, un átomo de silicio, el cual tiene una valencia de cuatro, obtiene ocho electrones en su capa de energía externa al compartir sus electrones de valencia con cuatro átomos de silicio circundantes, como en la figura 2-12a) y b). Cada instancia de la compartición representa un enlace covalente; por tanto, cada átomo de silicio está enlazado a cuatro átomos vecinos por medio de cuatro enlaces covalentes. Para que se formen enlaces covalentes, los átomos de silicio deben arreglarse de tal manera que los enlaces tengan una **relación direccional** fija entre sí. Se forma una relación direccional cuando los enlaces entre los átomos en un material enlazado de manera covalente forman ángulos específicos, que dependen del material. En el caso del silicio, este arreglo produce un tetraedro, con ángulos de 109.5° entre los enlaces covalentes [figura 2-12c)].

Los enlaces covalentes son muy fuertes. Como resultado, los materiales enlazados de manera covalente son muy resistentes y duros. Por ejemplo, el diamante (C), el carburo de silicio (SiC), el nitruro de silicio (Si_3N_4) y el nitruro de boro (BN) tienen enlaces covalentes. Estos materiales también exhiben puntos de fusión muy altos, lo cual significa que pudieran ser útiles en aplicaciones a altas temperaturas. Por otro lado, la temperatura alta necesaria para su procesamiento representa un desafío. Los materiales enlazados de esta manera por lo regular tienen ductilidad limitada debido a que los enlaces tienden a ser direccionales. La conductividad eléctrica de muchos materiales enlazados de manera covalente (por ejemplo, el silicio, el diamante y muchas cerámicas) no es alta dado que los electrones de valencia están encerrados en los enlaces entre los átomos y no están fácilmente disponibles para la conducción. Con algunos de estos materiales, tales como el Si, se pueden obtener niveles útiles y controlados de conductividad eléctrica introduciendo de manera deliberada pequeños niveles de otros elementos conocidos como dopantes. Los polímeros conductores también son un buen ejemplo de mate-

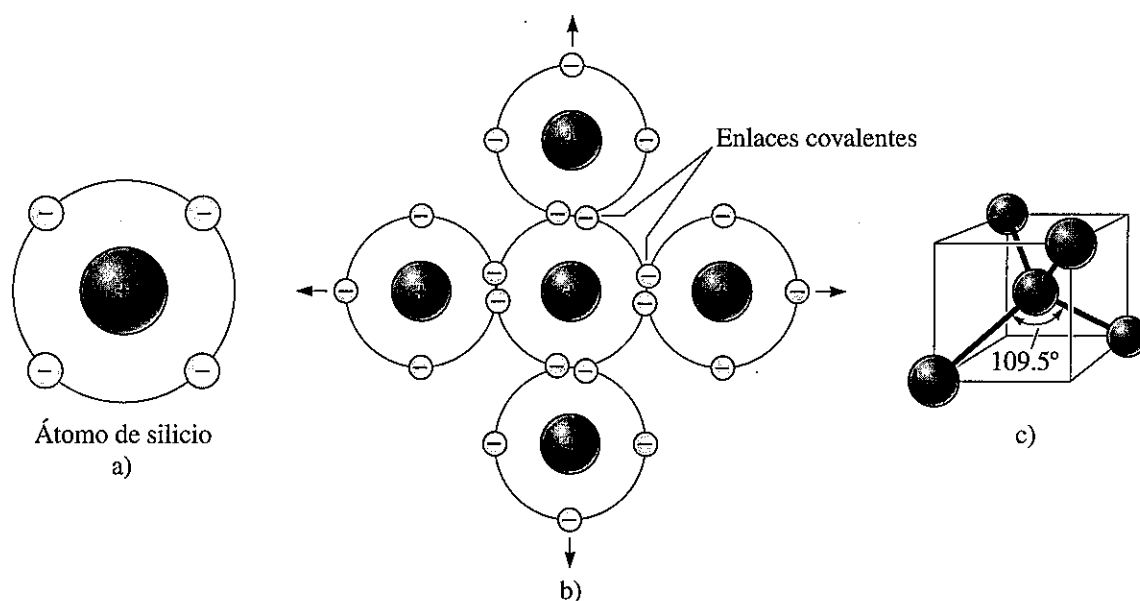


Figura 2-12 a) El enlace covalente requiere que los electrones se compartan entre los átomos de tal manera que cada átomo tenga llenos sus orbitales externos sp . b) En el silicio, con una valencia de cuatro, deben formarse cuatro enlaces covalentes. c) Los enlaces covalentes son direccionales. En el silicio, se forma una estructura tetraédrica con ángulos de 109.5° requeridos entre cada enlace covalente.

riales enlazados de manera covalente que pueden convertirse en materiales semiconductores. El desarrollo de polímeros conductores que sean ligeros ha capturado la atención de muchos científicos e ingenieros para el desarrollo de componentes electrónicos flexibles.

¡No se puede predecir de manera sencilla si un material será o no alto o bajo en resistencia, ductilidad o tendencia a quebrarse, basándose simplemente en la naturaleza del enlazamiento! Se necesita información adicional sobre las estructuras atómicas, micro y macro del material; sin embargo, la naturaleza del enlazamiento señala una tendencia para los materiales con ciertos tipos de enlazamiento y composiciones químicas. El ejemplo 2-3 explora cómo se unen el oxígeno y el silicio a través de uno de tales enlaces para formar la sílice.

Ejemplo 2-3

¿Cómo se unen los átomos de oxígeno y silicio para formar la sílice?

Suponiendo que la sílice (SiO_2) tiene un enlace 100% covalente, describa cómo se unen los átomos de oxígeno y silicio en la sílice (SiO_2).

SOLUCIÓN

El silicio tiene una valencia de cuatro y comparte electrones con cuatro átomos de oxígeno, por tanto da un total de ocho electrones por cada átomo de silicio. El oxígeno tiene una valencia de seis y comparte electrones con dos átomos de silicio, lo que da al oxígeno un total de ocho electrones. La figura 2-13 ilustra una de las estructuras posibles. De manera similar al silicio (Si), se produce una estructura tetraédrica. Más adelante en este capítulo se explicará cómo se justifica la naturaleza iónica y covalente del enlazamiento en la sílice.

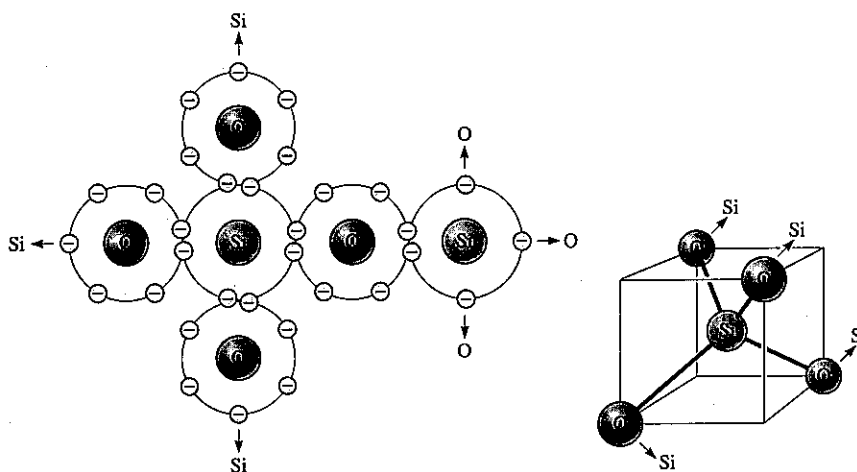


Figura 2-13 Estructura tetraédrica de la sílice (SiO_2), la cual contiene enlaces covalentes entre los átomos de silicio y oxígeno (para el ejemplo 2-3).

Enlace iónico Cuando está presente más de un tipo de átomo en un material, un átomo puede donar sus electrones de valencia a un átomo distinto, llenando la capa de energía externa del segundo átomo. Ambos átomos tienen ahora niveles de energía externos llenos (o vacíos), pero han adquirido una carga eléctrica y se comportan como iones. El átomo que aporta los electrones se queda con una carga neta positiva y se le llama **catión**, mientras que el átomo que acepta los electrones adquiere una carga neta negativa y se le llama **anión**. Los iones con carga opuesta son entonces atraídos entre sí y producen el **enlace iónico**. Por ejemplo, la atracción entre los iones de sodio y los de cloruro (figura 2-14) produce cloruro de sodio (NaCl), o sal de mesa.

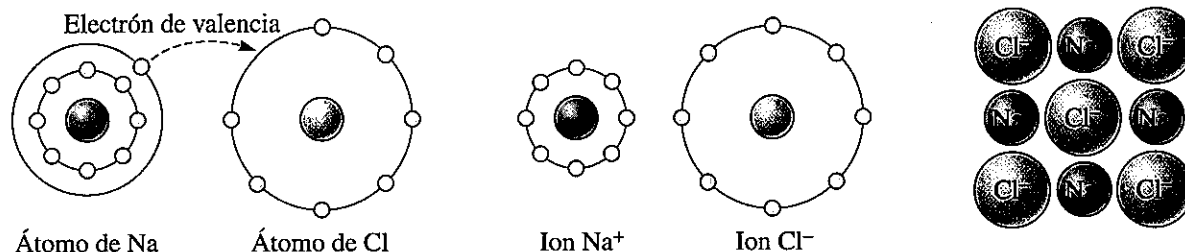


Figura 2-14 Se crea un enlace iónico entre dos átomos diferentes con electronegatividades distintas. Cuando el sodio dona su electrón de valencia al cloro, cada átomo se convierte en un ion, ocurre una atracción y se forma el enlace iónico.

Enlace de van der Waals El origen de las fuerzas de van der Waals entre átomos y moléculas es de naturaleza mecánica cuántica y una explicación detallada está más allá del alcance de este libro. Aquí se presenta una descripción simplificada. Si dos cargas eléctricas $+q$ y $-q$ están separadas por una distancia d , el momento dipolar se define como $q \times d$. Los átomos son eléctricamente neutros. También, los centros de la carga positiva (núcleo) y de la carga negativa (nube de electrones) coinciden. Por tanto, un átomo neutro no tiene momento dipolar. Cuando se expone un átomo neutro a un campo eléctrico interno o externo, el átomo puede polarizarse (es decir, los centros de las cargas positiva y negativa se separan). Esto crea o induce un momento dipolar (figura 2-15). En algunas moléculas no se tiene que inducir el momento dipolar, existe por virtud de la dirección de los enlaces y la naturaleza de los átomos. A estas moléculas se les conocen como **moléculas polarizadas**. El agua es un ejemplo de tales moléculas que tiene un momento dipolar inherente permanente (figura 2-16).

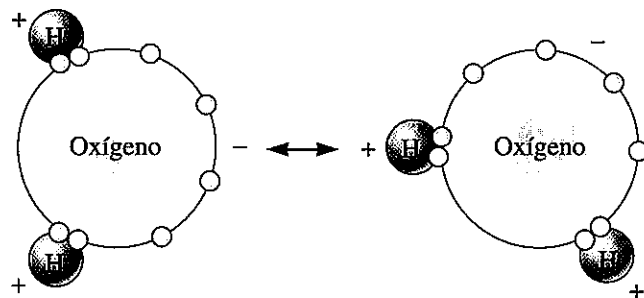
Las moléculas o átomos en los que hay un momento dipolar inducido o permanente se atraen entre sí. A la fuerza resultante se le conoce como fuerza de van der Waals. Las fuerzas de van der Waals entre átomos y moléculas tienen su origen en las interacciones entre los dipolos que son inducidos o en algunos casos en las interacciones entre los dipolos permanentes que están presentes en ciertas moléculas polares. Lo que es único acerca de estas fuerzas es que están presentes en todos los materiales.

Existen tres tipos de interacciones de **van der Waals**, llamadas fuerzas de London, fuerzas de Keesom y fuerzas de Debye. Si las interacciones son entre dos dipolos que están inducidos en los átomos o moléculas, se conocen como **fuerzas de London** (por ejemplo, el tetracloruro de carbono) (figura 2-15). Cuando un dipolo inducido (esto es, un dipolo que se induce en un átomo o una molécula que de otra manera sería no polar) interactúa con una molécula que tiene un momento dipolar permanente, esta interacción se conoce como **interacción de Debye**. Un ejemplo de esta interacción serían las fuerzas entre las moléculas de agua y las del tetracloruro de carbono.

Si las interacciones son entre moléculas que están polarizadas de manera permanente (por ejemplo, las moléculas de agua que atraen otras moléculas de agua u otras moléculas polares), se conocen como **interacciones de Keesom**. La atracción entre las regiones con carga



Figura 2-15 Ilustración de las fuerzas de London, un tipo de fuerza de van der Waals, entre átomos.

**Figura 2-16**

Las interacciones de Keesom se forman como resultado de la polarización de las moléculas o grupos de átomos. En el agua, los electrones en el oxígeno tienden a concentrarse lejos del hidrógeno. La diferencia de carga resultante permite que la molécula se enlace de manera débil a las demás moléculas de agua.

positiva de una molécula de agua y las regiones con carga negativa de una segunda molécula de agua proveen un enlace atractivo entre las dos moléculas de agua (figura 2-16).

Al enlace entre moléculas que tienen un momento dipolar permanente, conocido como fuerza de Keesom, con frecuencia se le conoce como **enlace de hidrógeno**, donde los átomos de hidrógeno representan una de las regiones polarizadas. Por tanto, el enlace de hidrógeno es en esencia una fuerza de Keesom y es un tipo de fuerza de van der Waals. La fuerza de Keesom relativamente intensa entre las moléculas de agua es la razón de por qué la tensión superficial (72 mJ/m^2 o dina/cm a temperatura ambiente) y el punto de ebullición del agua (100°C) son mucho más altos que los de varios líquidos orgánicos de peso molecular comparable (tensión superficial de ~ 20 a 25 dina/cm, puntos de ebullición superiores a 80°C).

Observe que los enlaces de van der Waals son **enlaces secundarios**, pero los átomos dentro de la molécula o grupo de átomos están unidos por medio de enlaces covalentes o iónicos fuertes. El calentar el agua al punto de ebullición rompe los enlaces de van der Waals y cambia el agua a vapor, pero se requieren temperaturas mucho más altas para romper los enlaces covalentes que unen los átomos de oxígeno e hidrógeno.

Aunque denominados “secundarios”, con base en las energías de enlace, las fuerzas de van der Waals desempeñan una función muy importante en varias áreas de la ingeniería. Las fuerzas de van der Waals entre átomos y moléculas desempeñan una función vital en la determinación de la tensión superficial y de los puntos de ebullición de los líquidos. En la ciencia e ingeniería de materiales, la tensión superficial de los líquidos y la energía superficial de los sólidos intervienen en diferentes situaciones. Por ejemplo, cuando se desea procesar polvos cerámicos o metálicos en partes sólidas densas, con frecuencia los polvos tienen que dispersarse en agua o en líquidos orgánicos. El que se pueda lograr esta dispersión de manera efectiva depende de la tensión superficial del líquido y de la energía superficial del material sólido. La tensión superficial de los líquidos también asume importancia cuando se trata con el procesamiento de metales y aleaciones fundidas (por ejemplo vaciado) y vidrios.

Los enlaces de van der Waals cambian de manera considerable las propiedades de ciertos materiales. Por ejemplo, el grafito y el diamante tienen propiedades mecánicas muy distintas. En varios materiales plásticos, las moléculas contienen partes polares o grupos laterales (por ejemplo, el algodón o la celulosa, el PVC, el Teflón). Las fuerzas de van der Waals proveen una fuerza de unión extra entre las cadenas de estos polímeros (figura 2-17).

Los polímeros en los que las fuerzas de van der Waals son más intensas tienden a ser relativamente más rígidos y exhiben temperaturas de transición vítrea relativamente más altas (T_v). La temperatura de transición vítrea es una temperatura debajo de la cual algunos polímeros tienden a comportarse como materiales quebradizos (es decir, muestran una mala ductilidad). Como resultado, los polímeros con enlazamiento de van der Waals (además de los enlaces covalentes en las cadenas y en los grupos laterales) son relativamente quebradizos a temperatura ambiente (por ejemplo, el PVC). En el procesamiento de tales polímeros, necesitan “plastificarse” adicionando otras moléculas polares más pequeñas que interactúan con las partes polares de las cadenas de polímero largas, por tanto se disminuye la T_v y se mejora la flexibilidad.

Enlaces mixtos

En la mayoría de los materiales, el enlazamiento entre los átomos es una mezcla de dos o más tipos. Por ejemplo, el hierro se enlaza por medio de una combina-

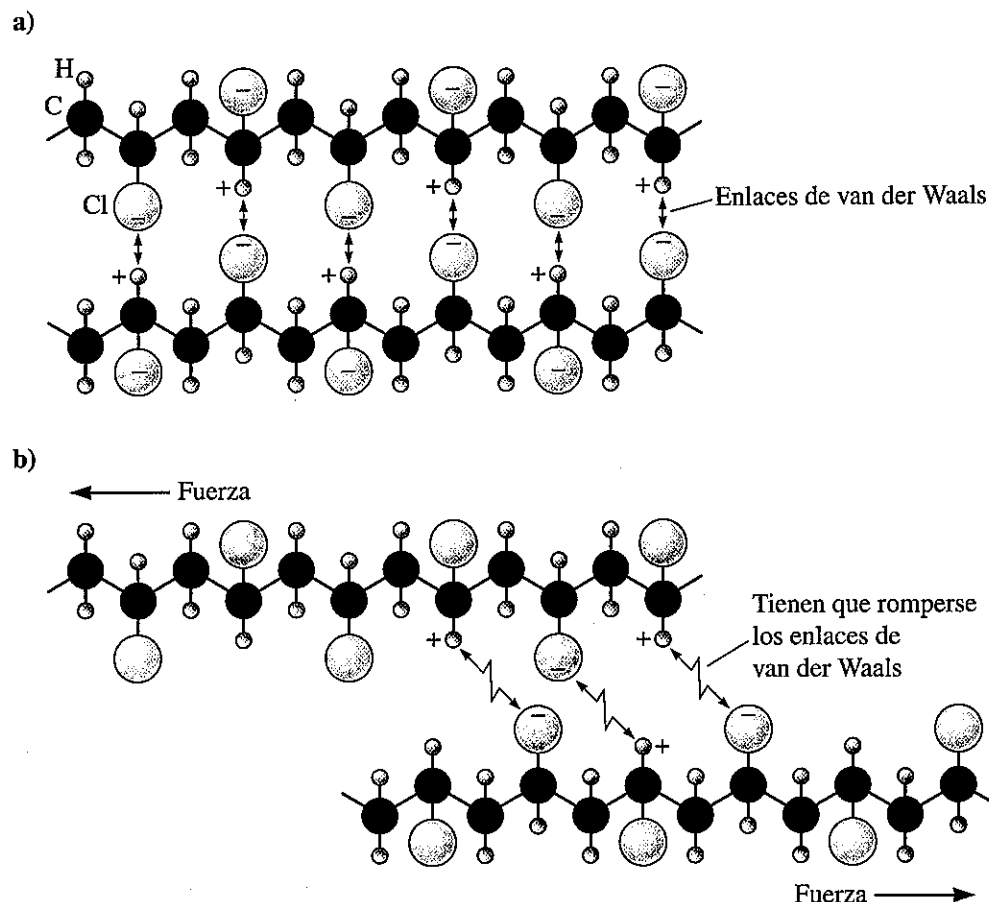


Figura 2-17 a) En el cloruro de polivinilo (PVC), los átomos de cloro unidos a la cadena del polímero tienen una carga negativa y los átomos de hidrógeno tienen carga positiva. Las cadenas se enlazan de manera débil por medio de enlaces de van der Waals. Este enlazamiento adicional hace más rígido al PVC. b) Cuando se aplica una fuerza al polímero, se rompen los enlaces de van der Waals y las cadenas se deslizan entre sí.

ción de enlace metálico y covalente que previene que los átomos se empaquen de una manera tan eficiente como podría esperarse.

Los compuestos formados a partir de dos o más metales (**compuestos intermetálicos**) pueden estar enlazados por medio de una mezcla de enlaces metálicos e iónicos, en particular cuando existe una gran diferencia en electronegatividad entre los elementos. Debido a que el litio tiene una electronegatividad de 1.0 y el aluminio tiene una electronegatividad de 1.5, se esperaría que el AlLi tenga una combinación de enlace metálico e iónico. Por otro lado, debido a que el aluminio y el vanadio tienen electronegatividades de 1.5, se esperaría que el Al_3V estuviera enlazado principalmente por medio de enlaces metálicos.

Muchos compuestos cerámicos y semiconductores, los cuales son combinaciones de elementos metálicos y no metálicos, tienen una mezcla de enlace covalente e iónico. A medida que aumenta la diferencia en electronegatividad entre los átomos, el enlace se vuelve más iónico. La fracción del enlace que es covalente puede calcularse a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Fracción covalente} = \exp(-0.25\Delta E^2) \quad (2-1)$$

donde ΔE es la diferencia en electronegatividades. El ejemplo 2-4 explora la naturaleza de los enlaces en la sílice.

Ejemplo 2-4

Determinar la fracción de enlace covalente en la sílice.

En el ejemplo anterior, se utilizó la sílice (SiO_2) como ejemplo de un material enlazado de manera covalente. En realidad, la sílice exhibe enlazamiento iónico y covalente. ¿Qué fracción del enlazamiento es covalente? Dé ejemplos de aplicaciones en las que se utiliza la sílice.

SOLUCIÓN

A partir de la figura 2-9, la electronegatividad del silicio es de 1.8 y la del oxígeno es de 3.5. La fracción del enlazamiento que es covalente es

$$\text{Fracción covalente} = \exp[-0.25(3.5 - 1.8)^2] = 0.486$$

Aunque el enlazamiento covalente sólo representa alrededor de la mitad del enlace, la naturaleza direccional de estos enlaces continúa desempeñando una función importante en la estructura del SiO_2 .

La sílice tiene muchas aplicaciones. Se utiliza para fabricar fibras de vidrio y ópticas. Se adicionan nanopartículas de sílice a los neumáticos para aumentar la rigidez del caucho. Los cristales de silicio (Si) de alta pureza se fabrican reduciendo la sílice a silicio.

2-6 Energía de unión y espaciado interatómico

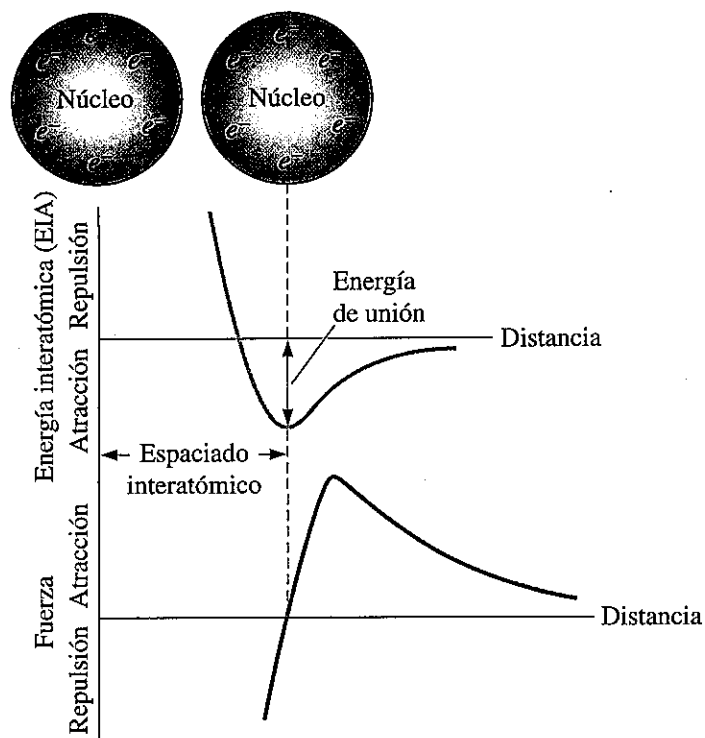
Espaciado interatómico La distancia de equilibrio entre átomos es ocasionada por un balance entre las fuerzas de repulsión y atracción. Por ejemplo, en el enlace metálico la atracción entre los electrones y las partes centrales de los iones está balanceada por la repulsión entre las partes centrales de los iones. La separación de equilibrio se establece cuando la energía interatómica total (EIA) del par de átomos está a un mínimo, o cuando no está actuando una fuerza neta para atraer o repeler los átomos (figura 2-18).

El **espaciado interatómico** en un metal sólido es *aproximadamente* igual al diámetro atómico, o al doble del radio atómico r . Sin embargo, no se puede utilizar esta aproximación para materiales enlazados de manera iónica dado que el espaciado es la suma de los dos radios iónicos distintos. En el apéndice B se listan los radios atómicos y iónicos para los elementos y se utilizarán en el siguiente capítulo.

La energía mínima en la figura 2-18 es la **energía de unión**, o la energía requerida para crear o romper el enlace. En consecuencia, los materiales que tienen una energía de unión alta también tienen una resistencia alta y una temperatura de fusión alta. Los materiales enlazados de manera iónica tienen una energía de unión particularmente grande (tabla 2-2) debido a la gran diferencia en las electronegatividades entre los iones. Los metales tienen energías de unión más bajas debido a que las electronegatividades de los átomos son similares.

Se pueden relacionar otras propiedades a las expresiones fuerza-distancia y energía-distancia en la figura 2-19. Por ejemplo, el **módulo de elasticidad** de un material (la pendiente (E) de la curva esfuerzo-deformación unitaria en la región elástica, también conocida como módulo de Young) está relacionada con la pendiente de la curva fuerza-distancia (figura 2-19). Una pendiente pronunciada, la cual está correlacionada con una energía de unión más alta y un punto de fusión más alto, significa que se requiere una fuerza mayor para estirar el enlace; por tanto, el material tiene un módulo de elasticidad alto.

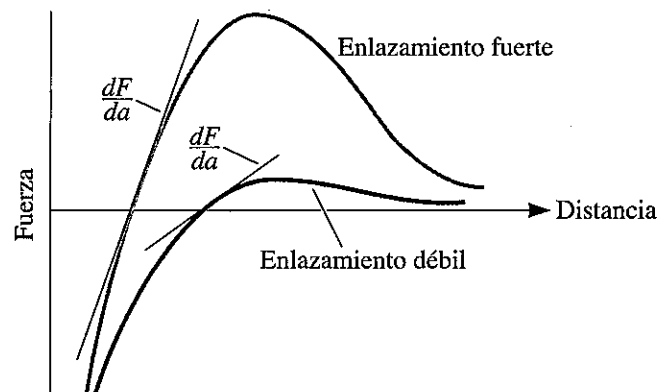
Una indicación interesante que necesita hacerse es que no todas las propiedades de los materiales de ingeniería son sensibles a la microestructura. El módulo de elasticidad es una de tales propiedades. Si se tienen dos muestras de aluminio que tienen en esencia la misma composición química pero distinto tamaño del grano, se espera que el módulo de elasticidad de

**Figura 2-18**

Los átomos o iones son separados por un espaciado de equilibrio que corresponde a la energía interatómica mínima para un par de átomos o iones (o cuando está actuando una fuerza cero para repeler o atraer los átomos o iones).

TABLA 2-2 ■ Energías de unión para los cuatro mecanismos de enlace

Enlace	Energía de enlace (kcal/mol)
Iónico	150-370
Covalente	125-300
Metálico	25-200
De van der Waals	<10

**Figura 2-19**

Curva fuerza-distancia ($F-a$) para dos materiales, que muestra la relación entre el enlace atómico y el módulo de elasticidad. Una pendiente dF/da pronunciada da un módulo alto.

estas muestras sea casi el mismo; sin embargo, los **límites elásticos**, el nivel de esfuerzo al que el material comienza a deformarse de manera permanente, de las muestras será bastante diferente. Por tanto, el límite elástico es una propiedad sensible a la microestructura. En los capítulos subsiguientes se aprenderá que, en comparación con otras propiedades mecánicas como el límite elástico y la resistencia a la tensión, el módulo de elasticidad no depende en gran medida de la microestructura. El módulo de elasticidad puede relacionarse de manera directa con la rigidez de los enlaces entre los átomos. Por tanto, el módulo de elasticidad depende principalmente de los átomos que conforman el material.

Otra propiedad que puede relacionarse con la energía de unión o las curvas fuerza-distancia interatómica es el **coeficiente de expansión térmica** (CET). El CET, con frecuencia denotado como α , es el cambio fraccional en dimensión lineal de un material por grado de temperatura. Puede escribirse $\alpha = (1/L)(dL/dT)$, donde L es la longitud y T es la temperatura. El CET está relacionado con la resistencia de los enlaces atómicos. Para que los átomos se muevan de su separación de equilibrio, debe suministrársele una energía al material. Si una depresión muy profunda de la energía interatómica (EIA) ocasionada por el enlazamiento atómico fuerte es característica del material (figura 2-20), los átomos se separan a un grado menor y tienen un coeficiente de expansión térmica lineal bajo. Los materiales con un coeficiente de expansión térmica bajo mantienen sus dimensiones de manera más exacta cuando cambia la temperatura. Es importante observar que existen características microestructurales (por ejemplo, la anisotropía o variación de propiedades, en la expansión térmica junto con las distintas direcciones cristalográficas) que también tienen un efecto significativo sobre el coeficiente de expansión térmica total de un material de ingeniería.

Los materiales que tienen una expansión muy baja son útiles en varias aplicaciones donde se espera que los componentes experimenten de manera repetida calentamiento y enfriamiento relativamente rápidos. Por ejemplo, las cerámicas de cordierita (utilizadas como catalizadores de soporte en los convertidores catalíticos en los automóviles), los vidrios de expansión ultrabaja (EUB), Visionware™ y otros vidrios-cerámicos desarrollados por Corning, tienen coeficientes de expansión térmica muy bajos. En el caso de las películas delgadas o los recubrimientos en los sustratos, no sólo se tiene interés en los valores reales de los coeficientes de expansión térmica sino también en la diferencia entre los coeficientes de expansión térmica entre el sustrato y la película o recubrimiento. Una diferencia muy grande entre estos ocasiona el desarrollo de esfuerzos que pueden conducir a la delaminación o a la deformación de la película o recubrimiento.

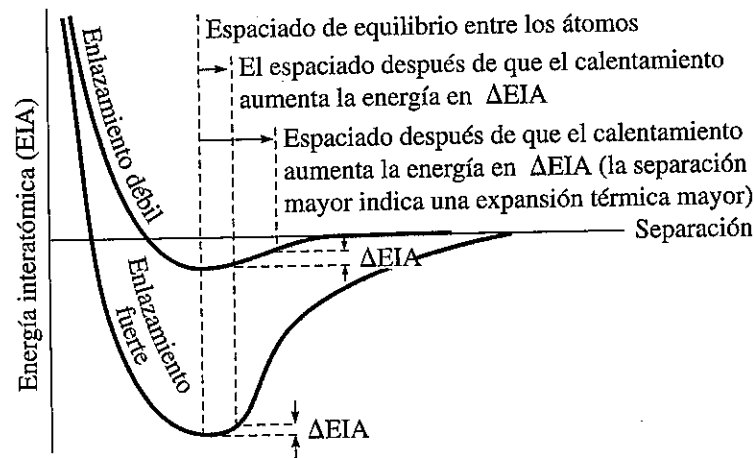


Figura 2-20 Curva de energía interatómica (EIA): separación para dos átomos. Los materiales que muestran una curva pronunciada con un depresión profunda tienen coeficientes lineales de expansión térmica bajos.

2-7 Las muchas formas del carbono: relaciones entre los arreglos de los átomos y las propiedades materiales

El carbono es uno de los elementos más abundantes en la Tierra. Es un componente esencial de todos los organismos vivos y tiene una significancia tecnológica enorme con un gran intervalo de aplicaciones. Por ejemplo, la datación por carbono es un proceso por medio del cual los científicos miden la cantidad de un isótopo de carbono radiactivo que está presente en los fósiles para determinar su edad y en la actualidad algunas de las tecnologías de punta explotan uno de los materiales más resistentes del mundo: los nanotubos de carbono. Y por supuesto, una cantidad pequeña de carbono (por ejemplo 0.5% en peso) convierte el hierro en acero.

El carbono puro existe como varios **alótropos**, lo que significa que el carbono puro existe en distintas formas (o tiene diferentes arreglos de sus átomos) que dependen de la temperatura y la presión. En el capítulo 3 se aprenderá más acerca de los alótropos. Dos alótropos del carbono son muy familiares para nosotros: el diamante y el grafito, mientras que otras dos formas del carbono se han descubierto de manera más reciente: el buckminsterfullereno también conocido como “buckybalón” y los nanotubos de carbono. De hecho, existen otros alótropos del carbono que no se explicarán aquí.

Los alótropos del carbono tienen la misma composición, son carbono puro, y aun así muestran propiedades materiales considerablemente distintas. La clave para la comprensión de estas diferencias es comprender cómo se arreglan los átomos en cada alótropo.

En este capítulo aprendió que el carbono tiene un número atómico de seis, lo que significa que tiene seis protones. Por tanto, un átomo de carbono neutro tiene seis electrones. Dos de estos electrones ocupan la capa cuántica más interna (llenándola por completo) y cuatro electrones ocupan la capa cuántica con el número cuántico principal $n = 2$. Cada átomo de carbono tiene cuatro electrones de valencia y puede compartir electrones con hasta cuatro átomos distintos. Por tanto, los átomos de carbono pueden combinarse con otros elementos al igual que con otros átomos de carbono. Esto permite que el carbono forme muchos compuestos distintos de estructura distinta al igual que varios alótropos de carbono puro.

La cultura popular valora uno de los alótropos de carbono sobre los demás: el diamante. La figura 2-21a) es un diagrama que muestra la unidad de repetición de la estructura del diamante. Cada esfera es un átomo y cada línea representa los enlaces covalentes entre los átomos de carbono. En el capítulo 3 aprenderá a realizar diagramas como éste. El diamante es un cristal, lo que significa que sus átomos se ordenan en un arreglo regular repetido. La figura 2-21a) muestra que cada átomo de carbono está enlazado a otros cuatro átomos de carbono. Estos enlaces son covalentes, lo que significa que cada átomo de carbono comparte cada uno de sus electrones más externos con un átomo de carbono adyacente, por lo que cada átomo tiene su capa cuántica más externa llena. Recuerde de la sección 2-5 que los enlaces covalentes son enlaces fuertes. La figura 2-21b) muestra de nuevo la estructura del diamante, pero la vista ha sido rotada 45 grados a partir de la figura 2-21a).

La figura 2-21c) es una micrografía del diamante que se obtuvo utilizando un instrumento conocido como microscopio electrónico de transmisión (MET). Un MET no toma simplemente una fotografía de los átomos; un MET percibe regiones de intensidad electrónica y, al hacerlo, mapea las localizaciones de los átomos.

El enlace covalente predominante en el diamante influye de manera profunda en sus propiedades macroscópicas. El diamante es uno de los materiales con punto de fusión más alto conocido con una temperatura de fusión de 3550 °C (6420 °F). Esto se debe al enlazamiento covalente fuerte entre los átomos. El diamante también tiene una de las conductividades térmicas más altas conocidas (2000 W/(m-K)). Por comparación, el aluminio (el cual es un excelente conductor térmico) tiene una conductividad térmica de sólo 238 W/(m-K). La conductividad térmica alta del diamante se debe a la rigidez de su estructura enlazada de manera covalente. El diamante es el material más rígido con un módulo de elasticidad de 1100 GPa. (En el capítulo 6, se tratará más acerca del módulo elástico; por ahora, simplemente hay que decir que el dia-

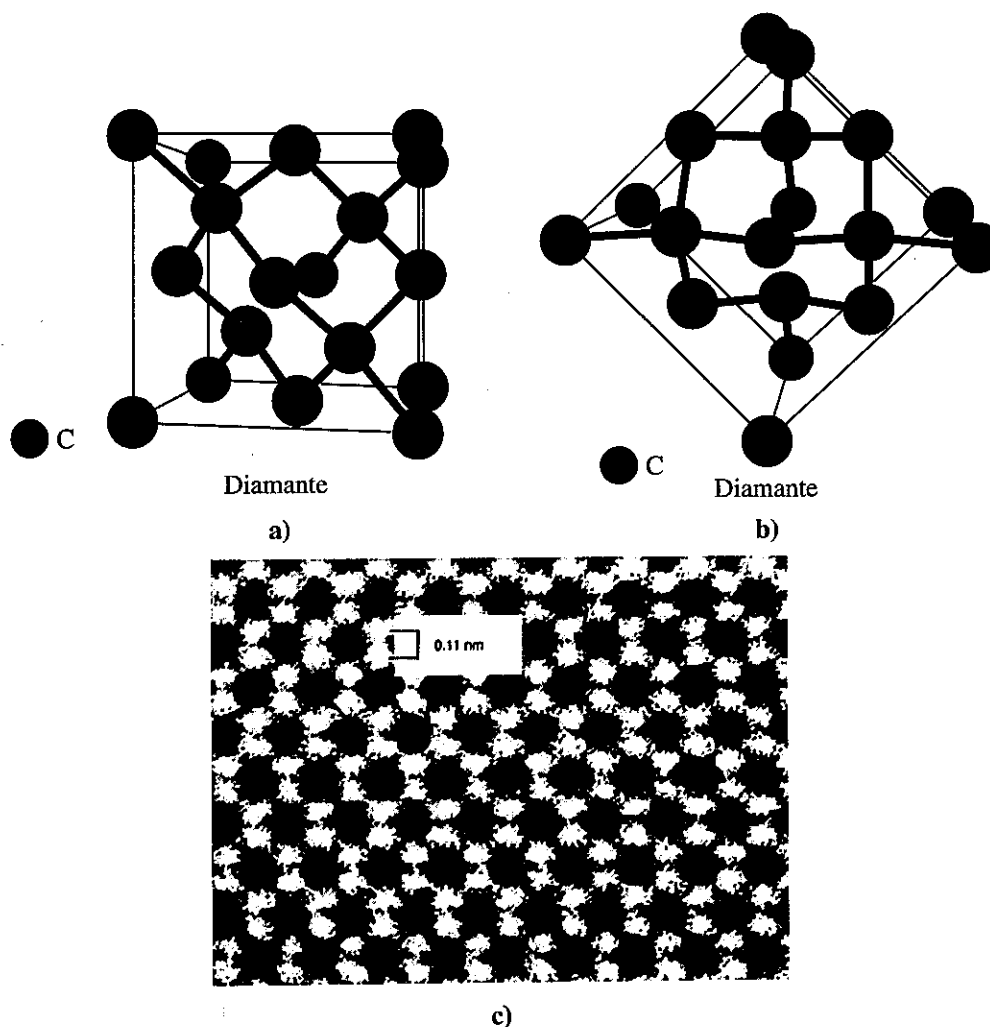


Figura 2-21 Estructura del diamante. a) La unidad de repetición del cristal de diamante, también conocida como la celda unitaria del diamante. b) La misma imagen que en a) rotada 45°. c) Micrografía electrónica de transmisión del diamante. (Cortesía del profesor Hiroshi Fujita.)

mante es casi 10 veces más rígido que el titanio y más de 15 veces más rígido que el aluminio.) A medida que se calienta el material, los átomos vibran con más energía. Cuando los enlaces son rígidos las vibraciones se transfieren de manera eficiente entre los átomos, por tanto conducen calor. Por otro lado, el diamante es un aislante eléctrico. Todos los electrones de valencia de cada átomo de carbono están compartidos con los átomos vecinos, lo que no deja electrones libres para conducir electricidad. (Por lo regular un aislante eléctrico también es un mal conductor de calor debido a que carece de electrones libres, pero el diamante es una excepción debido a su rigidez extraordinaria.) El diamante es una de las sustancias más duras conocidas, lo cual explica por qué se utiliza con frecuencia en herramientas de corte en aplicaciones industriales (la superficie de corte necesita ser más dura que el material a cortar).

El pariente menos lustroso (y brillante) del diamante es el grafito. El grafito, como el diamante puro, sólo contiene átomos de carbono, pero usted sabe a partir de la experiencia de escribir con lápices de grafito que las propiedades del grafito son significativamente distintas de las del diamante. En el grafito, los átomos de carbono se arreglan en capas. En cada capa, los átomos de carbono se ordenan en un patrón hexagonal, como se muestra en la figura 2-22a). Recuerde que en el diamante, cada átomo de carbono está enlazado de manera covalente a otros cuatro, pero en cada capa de grafito cada átomo de carbono está enlazado de manera covalente a sólo otros tres. Existe un cuarto enlace entre las capas, pero este es un enlace de

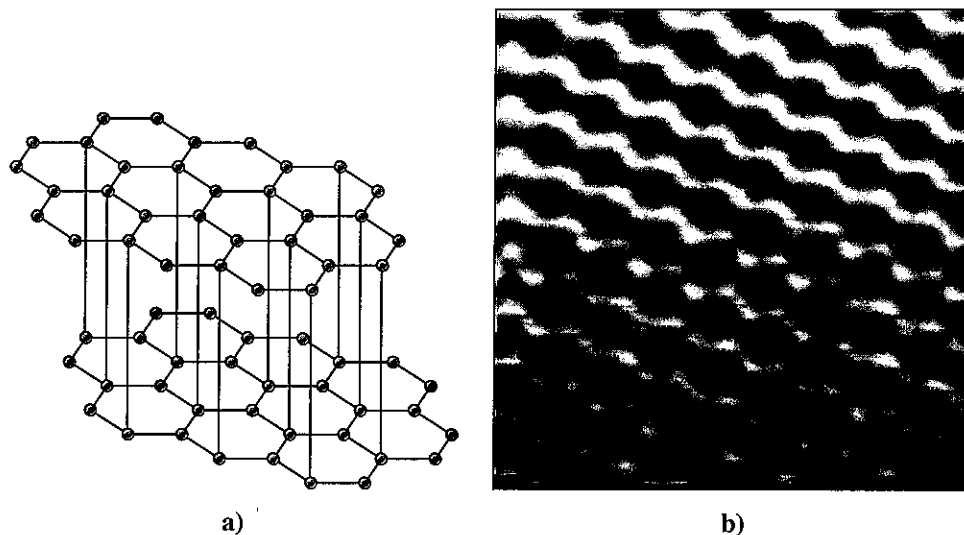


Figura 2-22 Estructura del grafito. a) Los átomos de carbono están arreglados en capas y en cada capa los átomos de carbono están ordenados en un patrón hexagonal. b) Micrografía de la fuerza atómica del grafito. (Cortesía de la University of Augsburg.)

van der Waals mucho más débil. También, el espaciado entre las capas del grafito es 2.5 veces mayor que el espaciado entre los átomos de carbono en el plano.

La figura 2-22b) es una imagen obtenida utilizando un instrumento conocido como microscopio de fuerza atómica (MFA). Un MFA escanea una punta afilada sobre la superficie de una muestra. La deflexión de la punta voladiza es rastreada por medio de un láser y un fotodetector sensible a la posición. En el MFA en modo de contacto, un actuador mueve la muestra con respecto a la punta para mantener una deflexión constante. De esta manera, se mapea la superficie de la muestra como una función de la altura. La figura 2-22b) muestra los átomos de carbono en una sola capa de grafito. Los átomos de carbono individuales son visibles. De nuevo se observa que aunque los modelos de barras y esferas de los cristales pueden parecer un tanto aproximados, son, de hecho, representaciones precisas de los arreglos atómicos en los materiales.

Como el diamante, el grafito tiene un punto de fusión alto. Al calentar un sólido hasta el punto en el que se vuelve un líquido, el espaciado entre los átomos debe incrementarse. En el grafito, no es difícil separar las capas individuales, debido a que los enlaces entre las capas son débiles (de hecho, esto es lo que usted hace cuando escribe con un lápiz de grafito, las capas se separan y se quedan en el papel), pero cada átomo de carbono tiene tres enlaces fuertes en la capa que ocasiona que el grafito tenga un punto de fusión alto. El grafito tiene una densidad menor que la del diamante debido a su estructura de capas: los átomos no están empaquetados de manera compacta entre sí. A diferencia del diamante, el grafito es eléctricamente conductor. Esto se debe a que el cuarto electrón de cada átomo de carbono, el cual no está enlazado de manera covalente en el plano, está disponible para conducir electricidad.

El buckminsterfullereno, un alótropo del carbono, fue descubierto en 1985. Cada molécula del buckminsterfullereno o "buckybalón" contiene 60 átomos de carbono y se conoce como C₆₀. Un buckybalón puede visualizarse considerando un patrón bidimensional de 12 pentágonos regulares y 20 hexágonos regulares ordenados como en la figura 2-23a). Si este patrón se pliega en una estructura tridimensional envolviendo el renglón central en un círculo y plegando cada extremo para formar tapas extremas, entonces los polígonos se ajustan entre sí de manera perfecta, ¡como un balón de fútbol soccer! Ésta es una estructura altamente simétrica con 60 esquinas y si se coloca un átomo de carbono en cada esquina, entonces es un modelo para la molécula de C₆₀.

El buckminsterfullereno fue nombrado por el matemático y arquitecto estadounidense R. Buckminster Fuller quien patentó el diseño del domo geodésico. Al pasar una corriente

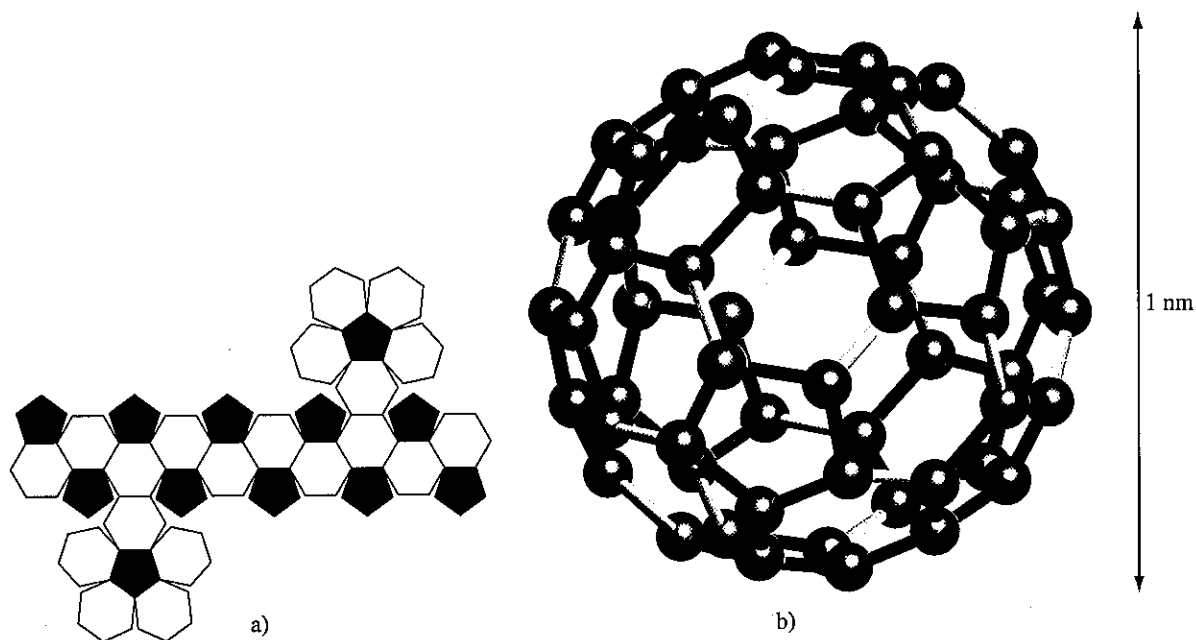
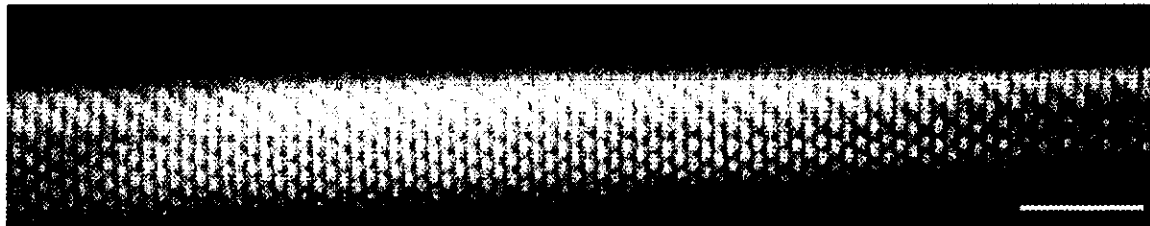
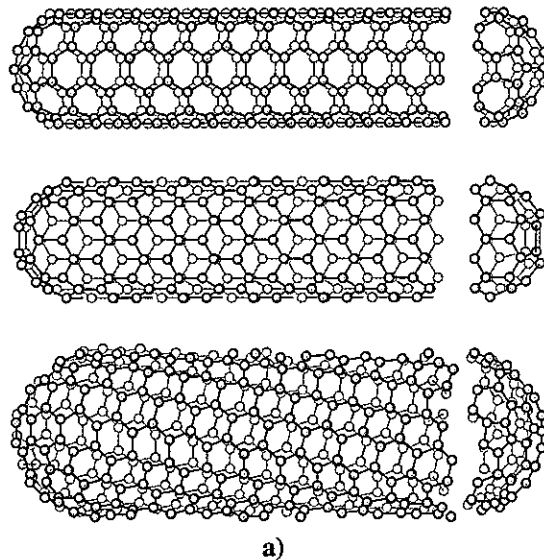


Figura 2-23 Estructura del buckybalón. a) Formación de un buckminsterfullereno a partir de 12 pentágonos regulares y 20 hexágonos regulares. b) Modelo de "barras y esferas" de la molécula de C₆₀. (Cortesía de Wendelin J. Wright.)

grande de alrededor de 150 amperes a través de una barra de carbono se crean buckybalones. Los buckybalones se encuentran en el hollín creado de esta manera al igual que en el hollín de estado natural, como el residuo de carbono de una vela quemándose.

La figura 2-23b es un modelo de un buckybalón sencillo. Cada uno de los 60 átomos de carbono tiene dos enlaces sencillos y un enlace doble. De hecho, existen formas distintas del C₆₀; por ejemplo, el C₇₀, que forma una clase de materiales de carbono conocidos por lo general como fullerenos. Los buckybalones pueden contener otros átomos dentro de ellos, parecen ser bastante fuertes y tienen propiedades magnéticas y superconductoras interesantes.

Los nanotubos de carbono, un cuarto alótropo del carbono, puede visualizarse como hojas de grafito enrolladas en tubos con tapas hemisféricas de fullereno en los extremos. Una hoja sencilla de grafito, conocida como grafeno, puede enrollarse en distintas direcciones para producir nanotubos con distintas configuraciones, como se muestra en la figura 2-24a). Los nanotubos de carbono pueden estar amurallados de manera sencilla o de manera múltiple. Los nanotubos de carbono amurallados de manera múltiple consisten en múltiples nanotubos concéntricos. Los nanotubos de carbono por lo regular son de 1 a 25 nm de diámetro y están en el orden de micrones (micras) de longitud. Las nanotubos de carbono con configuraciones distintas muestran propiedades materiales diferentes. Por ejemplo, las propiedades eléctricas de los nanotubos dependen de la helicidad y del diámetro de los nanotubos. Las nanotubos de carbono se están utilizando actualmente como refuerzo para endurecer y hacer más rígidos a los polímeros y como puntas para microscopios de fuerza atómica. Los nanotubos de carbono también están siendo considerados como posibles conductores de electricidad en dispositivos nanoelectrónicos avanzados. La figura 2-24b) es una imagen de un nanotubo de carbono amurallado de manera sencilla obtenida utilizando un instrumento conocido como microscopio de barrido de efecto túnel (STM, por sus siglas en inglés). Un STM escanea una punta afilada sobre la superficie de una muestra. Se aplica un voltaje a la punta. Los electrones de la punta hacen un efecto de túnel o "se fugan" a la muestra cuando la punta está en proximidad con los átomos de la muestra. La corriente resultante es una función de la distancia de la punta a la muestra y las mediciones de la corriente pueden utilizarse para mapear la superficie de la muestra.



b)

Figura 2-24 a) Diagramas esquemáticos de varias configuraciones de nanotubos de carbono amurallados de manera sencilla. (Cortesía de la figura 6 de Carbon Nanomaterials por Andrew R. Barron.) b) Micrografía de barrido de efecto túnel de un nanotubo de carbono. (Reimpresa con permiso de Macmillan Publishers Ltd: Nature 2004 noviembre 18; 432(7015), "Electrical generation and absorption of phonons in carbon nanotubes", LeRoy y colaboradores, derechos reservados 2004.)

Resumen

- De manera similar a la composición, la estructura de un material tiene una influencia profunda sobre las propiedades de un material.
- La estructura de los materiales puede comprenderse a varios niveles: estructura atómica, arreglos atómicos de largo y corto alcance, nanoestructura, microestructura y macroestructura. Los ingenieros que tratan con aplicaciones prácticas necesitan comprender la estructura a niveles micro y macro. Dado que los átomos y los arreglos atómicos constituyen los bloques de construcción de los materiales avanzados, se necesita comprender la estructura a un nivel atómico. Existen muchos dispositivos recientes emergentes centrados en los sistemas microelectromecánicos (SMEM) y en la nanotecnología. Como resultado, también es muy importante para algunas aplicaciones la comprensión de la estructura de los materiales a una nanoescala.

- La estructura electrónica del átomo, la cual está descrita por un conjunto de cuatro números cuánticos, ayuda a determinar la naturaleza del enlace atómico y por tanto, las propiedades físicas y mecánicas de los materiales.
- El enlace atómico está determinado de manera parcial por cómo interactúan los electrones de valencia asociados con cada átomo. Los tipos de enlaces incluyen metálicos, covalentes, iónicos y de van der Waals. La mayoría de los materiales de ingeniería exhiben un enlace mixto.
- Se forma un enlace metálico como resultado de los átomos de elementos con electronegatividad baja que donan sus electrones de valencia y conducen a la formación de un “mar” de electrones. Los enlaces metálicos no son direccionales y son relativamente fuertes. Como resultado, la mayoría de los metales puros muestran un módulo de Young y una ductilidad altos. Son buenos conductores de calor y electricidad y reflejan luz visible.
- Se forma un enlace covalente cuando se comparten electrones entre dos átomos. Los enlaces covalentes se encuentran en varios materiales poliméricos y cerámicos. Estos enlaces son fuertes y la mayoría de los materiales inorgánicos con enlaces covalentes exhiben niveles altos de resistencia, dureza y ductilidad limitada. La mayoría de los materiales plásticos basados en enlaces carbono-carbono (C-C) y carbono-hidrógeno (C-H) muestran resistencias relativamente más bajas y buenos niveles de ductilidad. La mayoría de los materiales enlazados de manera covalente tienden a ser aislantes eléctricos relativamente buenos. Algunos materiales como el Si y el Ge son semiconductores.
- El enlace iónico encontrado en varias cerámicas se produce cuando un electrón es “donado” por un átomo electropositivo a un átomo electronegativo, creando cationes con carga positiva y aniones con carga negativa. Al igual que en los materiales enlazados de manera covalente, estos materiales tienden a ser mecánicamente resistentes y duros, pero quebradizos. Los puntos de fusión de los materiales enlazados de manera iónica son relativamente altos. Estos materiales por lo general son aislantes eléctricos. Sin embargo, en algunos casos la microestructura de estos materiales puede adecuarse de tal manera que se obtiene una conductividad iónica significativa.
- Se forman enlaces de van der Waals cuando los átomos o grupos de átomos tienen una carga eléctrica no simétrica, lo que permite el enlazamiento por medio de una atracción electrostática. La asimetría en la carga es resultado de los dipolos que se inducen o de los dipolos que son permanentes.
- La energía de unión está relacionada con la fuerza de los enlaces y es particularmente alta en los materiales enlazados de manera iónica y covalente. Los materiales con una energía de unión alta con frecuencia tienen una temperatura de fusión alta, un módulo de elasticidad alto y un coeficiente de expansión térmica bajo.
- No todas las propiedades de los materiales son sensibles a la microestructura y el módulo de elasticidad es una de tales propiedades.
- En el diseño de componentes con materiales se necesita poner atención a la composición base del material. También es necesario comprender el enlazamiento en el material y realizar esfuerzos para adecuarlo de tal manera que se cumplan ciertos requerimientos de desempeño. Por último, también debe considerarse el costo de la materia prima, los costos de fabricación, el impacto ambiental y los factores que afectan la durabilidad.
- El carbono existe como varios alótropos que incluyen el diamante, el grafito, el buckminsterfullereno y los nanotubos de carbono. Todos están conformados por carbono puro, pero sus propiedades materiales difieren de manera considerable debido a los distintos arreglos de átomos en sus estructuras.

Glosario

Alotropía Característica de un elemento que es capaz de existir en más de una estructura cristalina, dependiendo de la temperatura y la presión.

Anión Ion con carga negativa producido cuando un átomo, por lo general de un no metal, acepta uno o más electrones.

Arreglos atómicos de corto alcance Arreglos atómicos superiores a una distancia de unos cuantos nm.

Arreglos atómicos de largo alcance Patrones tridimensionales repetitivos con los cuales se arreglan los átomos o iones en los materiales cristalinos.

Capa cuántica Conjunto de niveles de energía fijos a los que pertenecen los electrones. Cada electrón en la capa está designado por los cuatro números cuánticos.

Catión Ion con carga positiva producido cuando un átomo, por lo general de un metal, cede sus electrones de valencia.

Coefficiente de expansión térmica (CET) Cambio fraccional en la dimensión lineal de un material por grado de temperatura. Un material con un coeficiente de expansión térmica bajo tiende a mantener sus dimensiones cuando la temperatura cambia.

Composición Constitución química de un material.

Compuesto intermetálico Compuesto como el Al_3V conformado por dos o más átomos metálicos; el enlazamiento por lo regular es una combinación de enlaces metálicos y iónicos.

Constante de Avogadro Número de átomos o moléculas en un mol. La constante de Avogadro es 6.022×10^{23} por mol.

Ductilidad Habilidad de los materiales para estirarse o doblarse de manera permanente sin romperse.

Electronegatividad Tendencia relativa de un átomo a aceptar un electrón y convertirse en un anión. Los átomos altamente electronegativos aceptan con facilidad electrones.

Electropositivo Tendencia de los átomos a donar electrones, por tanto son altamente reactivos.

Elementos de transición Conjunto de elementos con orbitales *d* y *f* parcialmente llenos. Estos elementos por lo general exhiben una valencia múltiple y son útiles para aplicaciones electrónicas, magnéticas y ópticas.

Energía de unión Energía requerida para separar dos átomos de su espaciado de equilibrio a una distancia infinita. La energía de unión es una medida de la fuerza del enlace entre dos átomos.

Enlace covalente Enlace formado entre dos átomos cuando los átomos comparten sus electrones de valencia.

Enlace de hidrógeno Interacción de Keesom (un tipo de enlace de van der Waals) entre moléculas en las que está involucrado un átomo de hidrógeno (por ejemplo, los enlaces *entre* moléculas de agua).

Enlace de van der Waals Enlace secundario desarrollado entre átomos y moléculas como resultado de las interacciones entre los dipolos que son inducidos o permanentes.

Enlace iónico Enlace formado entre dos especies de átomos distintas cuando un átomo (el catión) dona sus electrones de valencia al segundo átomo (el anión). Una atracción electrostática une los iones entre sí.

Enlace metálico Atracción electrostática entre los electrones de valencia y las partes centrales de los iones con carga positiva.

Enlace secundario Enlaces débiles, como los enlaces de van der Waals, que por lo general unen moléculas entre sí.

Enlaces primarios Enlaces fuertes entre átomos adyacentes que resultan de la transferencia o compartición de los electrones de los orbitales externos.

Escala de longitud Distancia relativa o intervalo de distancias utilizado para describir la estructura, las propiedades o los fenómenos relacionados con los materiales.

Espaciado interatómico Espaciado de equilibrio entre los centros de dos átomos. En los elementos sólidos el espaciado interatómico es igual al diámetro aparente del átomo.

Espectroscopia Ciencia que analiza la emisión y absorción de la radiación electromagnética.

Estructura Descripción de los arreglos espaciales de los átomos o iones en un material.

Fuerzas de London Fuerzas de van der Waals que ocurren entre moléculas que no tienen momentos dipolares permanentes.

Interacciones de Debye Fuerzas de van der Waals que ocurren entre dos moléculas, con sólo una molécula teniendo un momento dipolar permanente.

Interacciones de Keesom Fuerzas de van der Waals que ocurren entre moléculas que tienen momentos dipolares permanentes.

Límite elástico Nivel de esfuerzo arriba del cual un material se deforma de manera permanente.

Macroestructura Estructura de un material a nivel macroscópico. La escala de longitud es de $\sim > 100\,000$ nm. Las características comunes incluyen la porosidad, los recubrimientos superficiales y las microfisuras internas o externas.

Masa atómica Masa de la constante de Avogadro de átomos, g/mol. Por lo general, éste es el número promedio de protones y neutrones en el átomo. También llamado peso atómico.

Material amorfo Material que no tiene un orden de largo alcance en el arreglo de sus átomos (por ejemplo, los vidrios de sílice).

Materiales cristalinos Materiales en los que los átomos están arreglados de una manera periódica que exhibe un orden de largo alcance.

Microestructura Estructura de un material a una escala de longitud de ~ 100 a $100\,000$ nm.

Módulo de elasticidad Pendiente de la curva esfuerzo-deformación unitaria en la región elástica (E). También conocido como módulo de Young.

Moléculas polarizadas Moléculas que han desarrollado un momento dipolar por virtud de un campo eléctrico interno o externo.

Nanoescala Escala de longitud de 1-100 nm.

Nanoestructura Estructura de un material a una nanoescala (escala de longitud de ~ 1 -100 nm).

Nanotecnología Conjunto emergente de tecnologías basadas en dispositivos, fenómenos y materiales a nanoescala.

Nucleón Protón o neutrón.

Número atómico Número de protones en un átomo.

Número cuántico acimutal Número cuántico que designa los distintos niveles de energía en las capas principales. También llamado número cuántico secundario.

Número cuántico del espín Número cuántico que indica el espín de un electrón.

Número cuántico magnético Número cuántico que describe los orbitales para cada número cuántico acimutal.

Números cuánticos Números que asignan los electrones en un átomo a los niveles de energía discretos. Los cuatro números cuánticos son el número cuántico principal n , el número cuántico acimutal l , el número cuántico magnético m_l y el número cuántico del espín m_s .

Principio de Aufbau Mecanismo gráfico utilizado para determinar el orden en el que son llenados por electrones los niveles de energía de las capas cuánticas.

Principio de exclusión de Pauli No más de dos electrones en un material pueden tener la misma energía. Los dos electrones tienen espines magnéticos opuestos.

Relación direccional Los enlaces entre los átomos en materiales enlazados de manera covalente forman ángulos específicos, dependiendo del material.

Semiconductor III-V Semiconductor que está basado en los elementos de los grupos 3A y 5B (por ejemplo, el GaAs).

Semiconductor II-VI Semiconductor que está basado en los elementos de los grupos 2B y 6B (por ejemplo, el CdSe).

Sistemas microelectromecánicos (SMEM) Consisten en dispositivos miniaturizados por lo general preparados por micromaquinación.

Temperatura de transición vítrea Temperatura arriba de la cual muchos polímeros y vidrios orgánicos dejan de comportarse como materiales quebradizos. Ganan una cantidad considerable de ductilidad arriba de la temperatura de transición de vidrio.

Unidad de masa atómica Masa de un átomo expresada como $1/12$ de la masa de un átomo de carbono con 12 nucleones.

Valencia Número de electrones en un átomo que participan en el enlazamiento o reacciones químicas. Por lo general, la valencia es el número de electrones en los niveles de energía externos s y p .

Problemas

Sección 2-1 Estructura de materiales: introducción

- 2-1** ¿Qué significa el término *composición* de un material?
- 2-2** ¿Qué significa el término *estructura* de un material?
- 2-3** ¿Cuáles son los diferentes niveles de la estructura de un material?
- 2-4** ¿Por qué es importante considerar la estructura de un material cuando se diseñan o fabrican componentes de ingeniería?
- 2-5** ¿Cuál es la diferencia entre la microestructura y la macroestructura de un material?

Sección 2-2 Estructura del átomo

- 2-6** Utilizando las densidades y los pesos atómicos dados en el apéndice A, calcule y compare el número de átomos por centímetro cúbico en i) el plomo y ii) el litio.
- 2-7** a) Utilizando la información del apéndice A, calcule el número de átomos de hierro en una tonelada (2000 libras).
b) Utilizando la información del apéndice A, calcule el volumen en centímetros cúbicos ocupado por un mol de boro.
- 2-8** Para chapar una parte de acero que tiene un área de superficie de 200 pulg² con una capa de níquel de 0.002 pulg de grosor: a) ¿Cuántos átomos de níquel se requieren? b) ¿Cuántos moles de níquel se requieren?

Sección 2-3 Estructura electrónica del átomo

- 2-9** Escriba la configuración electrónica para el elemento Tc.
- 2-10** Suponiendo que se sigue el principio de Aufbau, ¿cuál es la configuración electrónica esperada del elemento con el número atómico $Z = 116$?
- 2-11** Suponga que un elemento tiene una valencia de 2 y un número atómico de 27. Basándose sólo en los números cuánticos, ¿cuántos electrones deben estar presentes en el nivel de energía 3d?

Sección 2-4 Tabla periódica

- 2-12** La tabla periódica de los elementos puede ayudar a racionalizar mejor las tendencias en las

propiedades de los elementos y compuestos con base en los elementos de distintos grupos. Busque en la bibliografía y obtenga los coeficientes de expansión térmica de los elementos del grupo 4B. Establezca una tendencia y vea si se correlaciona con las temperaturas de fusión y otras propiedades (por ejemplo, el espacio de banda) de estos elementos.

- 2-13** El enlazamiento en el compuesto intermetálico Ni_3Al es predominantemente metálico. Explique por qué será un componente con poco, si no es que ningún, enlazamiento iónico. La electronegatividad del níquel es alrededor de 1.8.
- 2-14** Grafique las temperaturas de fusión de los elementos en las grupos 4A a 8-10 de la tabla periódica en función del número atómico (es decir, grafique las temperaturas de fusión del Ti al Ni, del Zr al Pd y del Hf al Pt). Explique estas relaciones, con base en el enlazamiento atómico y las energías de unión: a) a medida que aumenta el número en cada periodo de la tabla periódica, y b) a medida que aumenta el número atómico en cada grupo de la tabla periódica.
- 2-15** Grafique la temperatura de fusión de los elementos en el grupo 1A de la tabla periódica en función del número atómico (es decir, grafique las temperaturas de fusión del Li al Cs). Explique esta relación, con base en el enlace atómico y la energía de unión.

Sección 2-5 Enlace atómico

- 2-16** Compare y contraste los enlaces primarios metálicos y covalentes en términos de
a) la naturaleza del enlace,
b) la valencia de los átomos involucrados, y
c) la ductilidad de los materiales enlazados de estas formas.
- 2-17** ¿Qué tipo de enlazamiento posee el KCl? Explique por completo su razonamiento refiriéndose a la estructura electrónica y a las propiedades electrónicas de cada elemento.
- 2-18** Calcule la fracción del enlace del MgO que es iónico.
- 2-19** ¿Cuál es el tipo de enlace en el diamante? ¿Las propiedades del diamante son correspondientes con la naturaleza del enlace?

- 2-20** ¿Qué tipo de fuerzas de van der Waals actúan entre las moléculas de agua?
- 2-21** Explique la función de las fuerzas de van der Waals en el plástico PVC.

Sección 2-6 Energía de unión y espaciado interatómico

Sección 2-7 Las muchas formas del carbono: relaciones entre los arreglos de los átomos y las propiedades materiales

- 2-22** El titanio es más rígido que el aluminio, tiene un coeficiente de expansión térmica más bajo y una temperatura de fusión más alta que el aluminio. En la misma gráfica dibuje con cuidado y de manera esquemática las curvas razonablemente potenciales para ambos metales. Sea explícito al mostrar cómo se manifiestan las propiedades físicas en estas curvas.
- 2-23** El berilio y el magnesio, ambos en el grupo 2A de la tabla periódica, son metales ligeros. ¿Cuál esperaría que tuviera el módulo de elasticidad mayor? Explique, considerando la energía de unión y los radios atómicos, y utilizando diagramas apropiados de la fuerza en función del espaciado interatómico.
- 2-24** ¿Esperaría que el MgO o el magnesio tuvieran el mayor coeficiente de expansión térmica? Explique.
- 2-25** El aluminio y el silicio están lado a lado en la tabla periódica. ¿Cuál esperaría que tuviera el mayor módulo de elasticidad (E)? Explique.
- 2-26** El acero se recubre con una capa delgada de una cerámica para ayudar a protegerlo contra la corrosión. ¿Qué espera que le pase al recubrimiento cuando la temperatura del acero aumente de manera significativa? Explique.

en níquel. En principio, incluso, se pueden utilizar materiales cerámicos tales como la zirconia y otras aleaciones basadas en aceros. En algunos casos los álabes también pueden tener que recubrirse con una cubierta de barrera térmica (RBT) para minimizar la exposición del material del álabes a las altas temperaturas. ¿Qué parámetros de diseño consideraría en la selección del material para los álabes de la turbina y para el recubrimiento que funcionarían exitosamente en un motor de turbina? Observe que distintas partes del motor están expuestas a diferentes temperaturas y que no todos los álabes están expuestos a temperaturas de operación relativamente altas. ¿Qué problemas podrían presentarse? Considere los factores como la temperatura y la humedad en el ambiente en los que los álabes de la turbina deben funcionar.

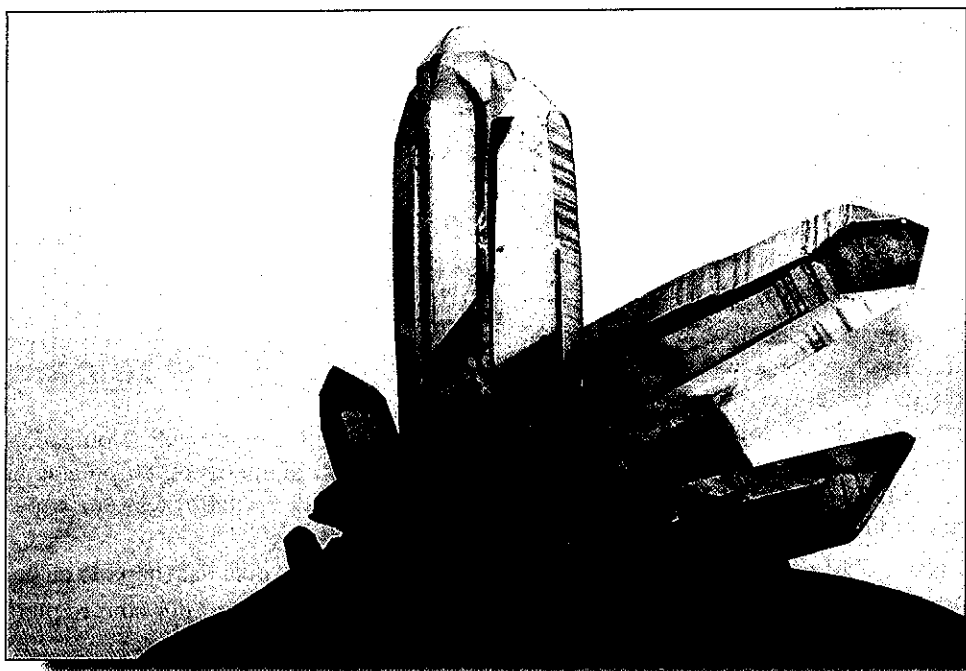
Knovel® Problemas

- K2-1** • Un disco de acero de 2 pulgadas de grosor con un diámetro de 80 pulg se ha chapado (electrodepositado) con una capa de zinc de 0.0009 pulg.
- ¿Cuál es el área del chapado en cm^2 ?
 - ¿Cuál es el peso del zinc requerido en kg? ¿En g?
 - ¿Cuántos moles de zinc se requieren?
 - Nombre unos cuantos métodos distintos utilizados para la deposición del zinc en un sustrato de acero.
 - ¿Qué método debe seleccionar en este caso?



Problemas de diseño

- 2-27** Desea introducir fibras cerámicas en una matriz metálica para producir un material compuesto, el cual está sometido a fuerzas intensas y a grandes cambios de temperatura. ¿Qué parámetros de diseño podría considerar para asegurar que las fibras permanezcan intactas y proporcionen resistencia a la matriz? ¿Qué problemas podrían presentarse?
- 2-28** Los álabes de las turbinas utilizadas en los motores de jet pueden fabricarse a partir de materiales como las superaleaciones basadas



El cuarzo, también conocido como sílice con la fórmula química SiO_2 , es el mineral encontrado en la arena. El cuarzo es uno de los materiales más abundantes en la Tierra. Con base en su peso, el costo de la arena es muy económico; sin embargo, la sílice es el material que se refina para fabricar el silicio de grado electrónico, uno de los materiales más puros y casi perfectos en el mundo. Las obleas de silicio son los sustratos de los microchips, como los encontrados en el procesador de su computadora. Si bien una tonelada de arena puede costar sólo decenas de dólares, una tonelada de microchips de silicio vale miles de millones de dólares.

La imagen anterior muestra un cristal de cuarzo. Un material cristalino en el que los átomos están ordenados en un arreglo regular repetitivo. Las facetas de los cristales reflejan el orden de largo alcance de los arreglos atómicos. (Cortesía de Galyna Andrushko/Shutterstock.)

Arreglos atómicos e iónicos

¿Se ha preguntado alguna vez?

- ¿Qué es el silicio amorfo y en qué es distinto del silicio utilizado para fabricar chips de computadora?
- ¿Qué son los cristales líquidos?
- Si fuera a empaquetar una caja cúbica con esferas de tamaño uniforme, ¿cuál es el empaquetamiento máximo posible?
- ¿Cómo se puede calcular la densidad de los distintos materiales?

Los arreglos de átomos y iones desempeñan una función importante en la determinación de la microestructura y las propiedades de un material. Los objetivos principales de este capítulo son:

- a) aprender a clasificar los materiales con base en sus arreglos atómicos/iónicos y
- b) describir los arreglos en los sólidos cristalinos de acuerdo con conceptos de la **red**, la **base** y la **estructura cristalina**.

Para sólidos cristalinos se ilustrarán los conceptos de redes de Bravais, celdas unitarias, direcciones cristalográficas y planos examinando los arreglos de átomos o iones en muchos materiales de importancia tecnológica. Éstos incluyen los metales (por ejemplo, Cu, Al, Fe, W, Mg, etc.), los semiconductores (por ejemplo, Si, Ge, GaAs, etc.), las cerámicas avanzadas (por ejemplo, ZrO_2 , Al_2O_3 , $BaTiO_3$, etc.), las cerámicas superconductoras, el diamante y otros materiales. Se desarrollará la nomenclatura necesaria utilizada para caracterizar los arreglos atómicos o iónicos en los materiales cristalinos. Se examinará el uso de la **difracción de rayos x** (DRX), de la **microscopía electrónica de transmisión** (MET) y de la **difracción de electrones**. Estas técnicas permiten explorar los arreglos de los átomos/iones en los distintos materiales. Se presentará una visión general de los tipos diferentes de **materiales amorfos** como el silicio amorfo, los vidrios metálicos, los polímeros y los vidrios inorgánicos.

El capítulo 2 enfatizó cómo influye el enlace interatómico en ciertas propiedades de los materiales. Este capítulo pondrá énfasis en la influencia de los arreglos atómicos e iónicos sobre las propiedades de los materiales de ingeniería. En particular, se concentrará en los arreglos "perfectos" de los átomos o iones en los sólidos cristalinos.

Los conceptos explicados en este capítulo lo prepararán para la comprensión de cómo las *desviaciones* de estos arreglos perfectos en los materiales cristalinos crean lo que se describe como **defectos a nivel atómico**. El término **defecto** en este contexto se refiere a la falta de perfección en el orden atómico o iónico de los cristales y no a cualquier falla o cualidad de un material de ingeniería. En el capítulo 4 se describirán cómo estos defectos a nivel atómico en realidad permiten el desarrollo de los aceros formables y resistentes utilizados en los automóviles y las construcciones, las aleaciones de aluminio para aviones, las celdas solares y los módulos fotovoltaicos para los satélites y muchas otras tecnologías.

3-1

Orden de corto alcance frente a orden de largo alcance

En los distintos estados de la materia, se pueden definir cuatro tipos de arreglos (o distribuciones) atómicos o iónicos (figura 3-1).

Sin orden En los gases monoatómicos, tales como el argón (Ar) o el plasma creado en una lámpara fluorescente, los átomos o iones no tienen un arreglo ordenado.

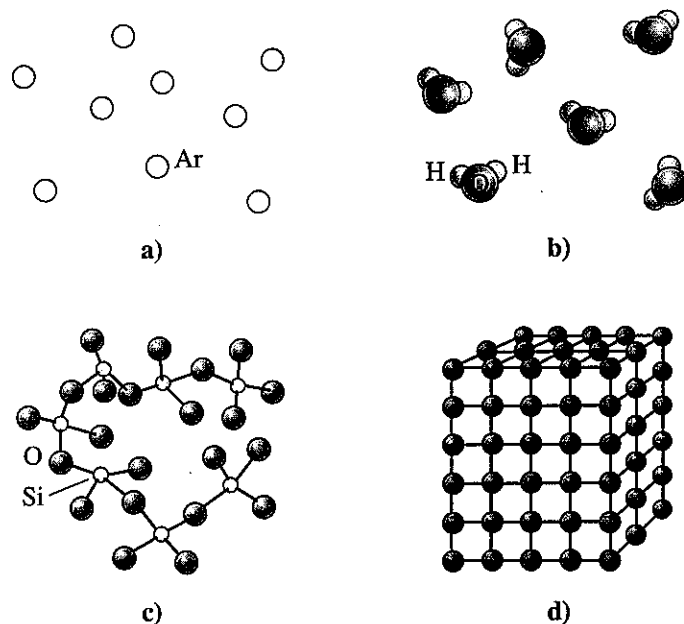


Figura 3-1 Niveles de arreglos atómicos en los materiales: a) Los gases monoatómicos inertes no tienen un ordenamiento regular de átomos. b), c) Algunos materiales, incluyendo el vapor de agua, el gas nitrógeno, el silicio amorfo y el vidrio de silicato tienen orden de corto alcance. d) Los metales, las aleaciones, muchas cerámicas y algunos polímeros tienen un ordenamiento regular de átomos/iones que se extiende a lo largo del material.

Orden de corto alcance (OCA) Un material muestra orden de corto alcance (OCA) si el arreglo especial de los átomos sólo se extiende a los átomos vecinos más cercanos. Cada molécula de agua en el vapor tiene un orden de corto alcance debido a los enlaces covalentes entre los átomos de hidrógeno y oxígeno; es decir, cada átomo de oxígeno se une a dos átomos de hidrógeno, formando un ángulo de 104.5° entre los enlaces. Sin embargo, no existe un orden de largo alcance debido a que las moléculas de agua en el vapor no tienen un arreglo especial con respecto a la posición de las demás.

Existe una situación similar en los materiales conocidos como vidrios inorgánicos. En el capítulo 2, se describió la **estructura tetraédrica** en la sílice que cumple el requerimiento de que cuatro iones oxígeno estén enlazados a cada ion silicio [figura 3-2a)]. Como se explicará posteriormente, en un vidrio, las unidades tetraédricas individuales se unen entre sí de manera aleatoria. Estos tetraedros pueden compartir esquinas, aristas o caras. Por tanto, más allá de la unidad básica de un tetraedro de $(\text{SiO}_4)^{4-}$, no existe periodicidad en su arreglo. En contraste, en el cuarzo y otras formas de sílice cristalina, los tetraedros $(\text{SiO}_4)^{4-}$ están conectados en distintos arreglos periódicos.

Muchos polímeros también muestran arreglos atómicos de corto alcance que se parecen mucho a la estructura del vidrio de silicato. El polietileno es un compuesto de cadenas de átomos de carbono con dos átomos de hidrógeno unidos a cada carbono. Debido a que el carbono tiene una valencia de cuatro y los átomos de carbono e hidrógeno están enlazados de manera covalente, de nuevo se produce una estructura tetraédrica [figura 3-2 b)]. Las unidades tetraédricas pueden unirse de manera aleatoria para producir cadenas de polímero.

Orden de largo alcance (OLA) La mayoría de los metales y las aleaciones, los semiconductores, las cerámicas y algunos polímeros tienen una estructura cristalina en la que los átomos o iones muestran un **orden de largo alcance (OLA)**; el arreglo atómico especial se extiende sobre escalas de longitud mucho mayores a $\sim >100$ nm. Los átomos o iones en estos materiales forman un patrón repetitivo regular parecido a una cuadrícula en tres dimensiones. A estos materiales se les conoce como **materiales cristalinos**. Si un material cristalino únicamente consiste en un solo cristal grande, se le conoce como *monocristal*. Los monocristales son útiles en muchas aplicaciones electrónicas y ópticas. Por ejemplo, los chips de computadora se fabrican a partir de silicio en la forma de monocristales grandes (de hasta 12 pulgadas de diámetro) [figura 3-3a)]. De manera similar, muchos dispositivos optoelectrónicos útiles se fabrican a partir de cristales de niobato de litio (LiNbO_3). Los monocristales también pueden fabricarse como películas delgadas y utilizarse para muchas aplicaciones electrónicas y otras. Ciertos tipos de álabes de turbinas también se fabrican a partir de monocristales de superaleaciones basadas en níquel. Un **material policristalino** está constituido por varios cristales más pequeños con diversas orientaciones en el espacio. A estos cristales más pequeños se les conoce como **granos**. A los límites entre los cristales, donde los cristales están en desalineamiento se les conoce como **límites de grano**. La figura 3-3-b) muestra la microestructura de un material de acero inoxidable policristalino. Muchos mate-

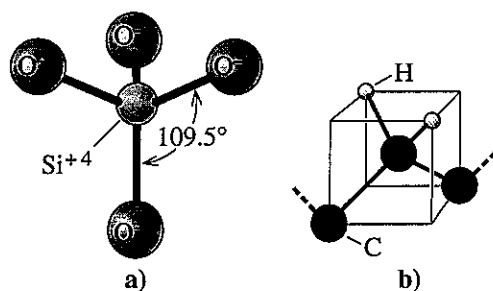


Figura 3-2

a) Tetraedro básico de Si-O en el vidrio de silicato. b) Arreglo tetraédrico de los enlaces C-H en el polietileno.

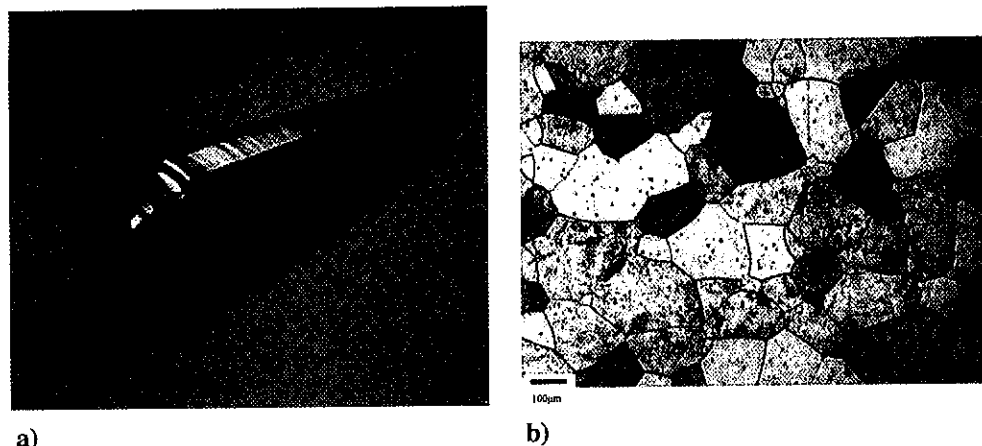


Figura 3-3 a) Fotografía de un monocristal de silicio. b) Micrografía de un acero inoxidable policristalino que muestra los granos y los límites de los granos. (Cortesía de los doctores A. J. Deardo, M. Hua y J. García.)

riales cristalinos con los que se trata en aplicaciones de ingeniería son policristalinos (por ejemplo, los aceros utilizados en la construcción, las aleaciones de aluminio para aviones, etc.). En capítulos posteriores aprenderá que muchas propiedades de los materiales policristalinos dependen de las características físicas y químicas de los granos y de sus límites. Las propiedades de los materiales monocristalinos dependen de la composición química y de las direcciones específicas dentro del cristal (conocidas como direcciones cristalográficas). El orden de largo alcance en los materiales cristalinos puede detectarse y medirse utilizando técnicas como la **difracción de rayos x** o la **difracción de electrones** (véase la sección 3-9).

Los **cristales líquidos (CL)** son materiales poliméricos que tienen un tipo especial de orden. Los polímeros de cristal líquido se comportan como materiales amorfos (de modo parecido a los líquidos) en un estado. Cuando se provee un estímulo externo (tal como un campo eléctrico o un cambio en la temperatura), algunas moléculas de polímero experimentan una alineación y forman pequeñas regiones que son cristalinas, de ahí el nombre de “cristales líquidos”. Estos materiales tienen muchas aplicaciones comerciales en la tecnología de las pantallas de cristal líquido (LCD).

La figura 3-4 muestra un resumen de la clasificación de los materiales con base en el tipo de orden atómico.

3-2 Materiales amorfos

Cualquier material que sólo exhibe un orden de corto alcance de átomos o iones es un **materias amorpho**; es decir, un material no cristalino. En general, se busca que la mayoría de los materiales formen arreglos periódicos dado que esta configuración maximiza la estabilidad termodinámica del material. Los materiales amorfos tienden a formarse cuando, por alguna u otra razón, la cinética del proceso por medio del cual se prepararon no permite la formación de arreglos periódicos. Los **vidrios**, los cuales por lo general se forman en sistemas cerámicos o poliméricos, son buenos ejemplos de materiales amorfos. De manera similar, ciertos tipos de geles poliméricos o coloidales, o materiales parecidos a geles, también se consideran amorfos. Los materiales amorfos con frecuencia ofrecen una mezcla única de propiedades dado que los átomos o iones no están ensamblados en sus arreglos “regulares” y periódicos. Observe que

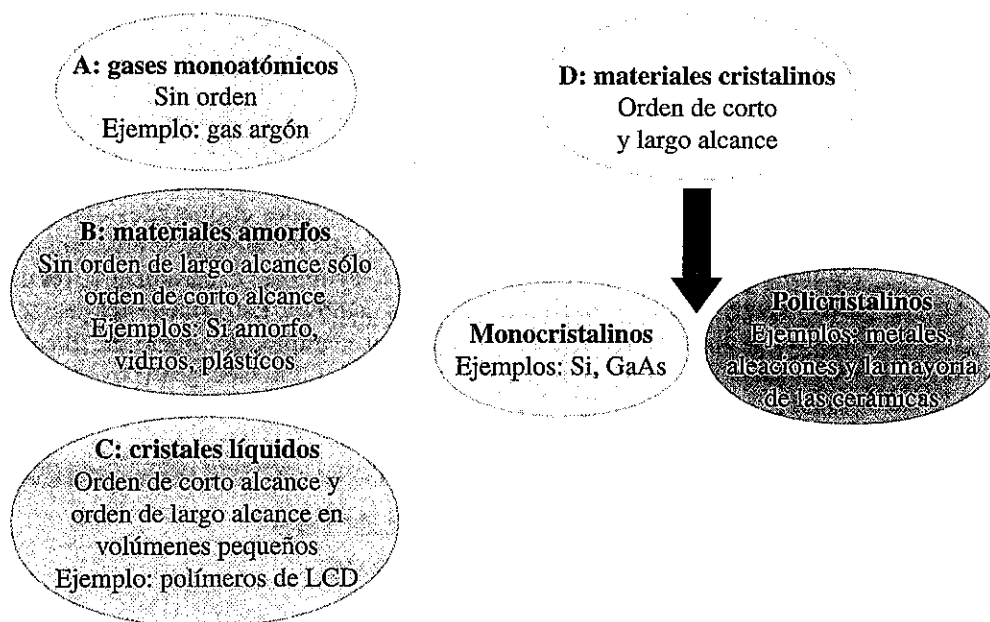


Figura 3-4 Clasificación de los materiales con base en el tipo de orden atómico.

con frecuencia muchos materiales de ingeniería etiquetados como “amorfos” pueden contener una fracción que es cristalina. Las técnicas como la difracción de electrones y la difracción de rayos x (véase la sección 3-9) no pueden utilizarse para caracterizar el orden de corto alcance en los materiales amorfos. Los científicos utilizan la dispersión de neutrones y otros métodos para investigar el orden de corto alcance en los materiales amorfos.

La **cristalización** de los vidrios puede controlarse. Los científicos e ingenieros de materiales, como Donald Stookey, han desarrollado métodos de nucleación deliberada de cristales ultrafinos en vidrios amorfos. Los materiales resultantes, conocidos como **vidrios-cerámicos**, pueden fabricarse hasta ~99.9% cristalinos y son bastante resistentes. Algunos vidrios-cerámicos puede fabricarse ópticamente transparentes manteniendo el tamaño de los cristales extremadamente pequeño ($\sim < 100$ nm). La ventaja principal de los vidrios-cerámicos es que se modelan utilizando técnicas de formación del vidrio, sin embargo, se transforman por último en materiales cristalinos que no se estrellan como el vidrio. En el capítulo 9 se considerará a mayor detalle este tema.

De manera similar a otros vidrios inorgánicos, muchos plásticos también son amorfos. Contienen porciones pequeñas del material que son cristalinas. Durante el procesamiento, se enredan entre sí cadenas relativamente grandes de moléculas del polímero, de forma parecida al espagueti. Las moléculas de polímeros enredadas no se organizan en materiales cristalinos. Durante el procesamiento de botellas poliméricas de bebidas, se aplica un esfuerzo mecánico para fabricar la botella (por ejemplo, la fabricación de una botella de refresco estándar de 2 litros utilizando tereftalato de polietileno (plástico PET)). A este proceso se le conoce como **formación por soplado y estiramiento**. Los esfuerzos radiales (del soplado) y longitudinales (del estiramiento) durante la formación de la botella en realidad desenredan algunas de las cadenas de polímero, ocasionando una **cristalización inducida por esfuerzo**. La formación de cristales añade la resistencia de las botellas de PET.

En comparación con los plásticos y los vidrios inorgánicos, los metales y las aleaciones tienden a formar materiales cristalinos con bastante facilidad. Como resultado, deben realizarse esfuerzos especiales para enfriar rápidamente los metales y aleaciones a fin de prevenir su cristalización: para algunas aleaciones se requiere una velocidad de enfriamiento $> 10^6$ °C/s para formar **vidrios metálicos**. A esta técnica de enfriamiento muy rápido de meta-

les y aleaciones se le conoce como **solidificación rápida**. Muchos vidrios metálicos tienen propiedades útiles e inusuales. En el capítulo 6 se explicarán las propiedades mecánicas de los vidrios metálicos.

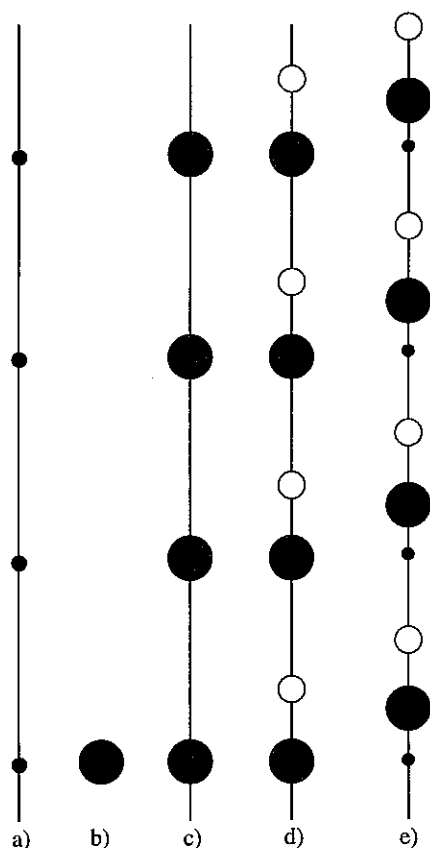
Para resumir, los materiales amorfos pueden fabricarse restringiendo que los átomos/iones asuman sus posiciones periódicas “regulares”. Esto significa que los materiales amorfos no poseen un orden de largo alcance. Esto permite formar materiales con propiedades diferentes e inusuales. Muchos materiales etiquetados como “amorfos” pueden contener algún nivel de cristalinidad. Dado que los átomos se ensamblan en posiciones sin equilibrio, la tendencia natural de un material amorfo es cristalizarse (es decir, esto conduce a un material termodinámicamente más estable). Esto puede realizarse proveyendo una fuerza conductora térmica apropiada (por ejemplo, un vidrio de silicato), una térmica y mecánica (por ejemplo, el polímero de PET) o una eléctrica (por ejemplo, el polímero de cristal líquido).

3-3 Red, base, celdas unitarias y estructuras cristalinas

Un sólido común contiene un orden de 10^{23} átomos/cm³. Para comunicar los arreglos espaciales de los átomos en un cristal, está claro que no es necesario o práctico especificar la posición de cada átomo. Se explicarán dos metodologías complementarias para describir de manera sencilla los arreglos tridimensionales de los átomos en un cristal. Se hará referencia a éstas como el **concepto de red y base** y el concepto de **celda unitaria**. Estos conceptos se basan en los principios de la **cristalografía**. En el capítulo 2 se explicó la estructura del átomo. Un átomo consiste en un núcleo de protones y neutrones rodeado por electrones, pero para el propósito de la descripción de los arreglos de átomos en un sólido, se visualizarán los átomos como esferas rígidas, muy parecidas a pelotas de ping-pong. Se comenzará con el concepto de red y base.

Una red es una colección de puntos llamados **puntos de red**, los cuales se arreglan en un patrón periódico de tal manera que los entornos de cada punto en la red sean idénticos. Una red es una construcción puramente matemática y es infinita en extensión. Una red puede ser uni, bi o tridimensional. En una dimensión sólo existe una red posible: es una línea de puntos con los puntos separados entre sí por una distancia igual, como se muestra en la figura 3-5a). A un grupo de uno o más átomos localizados en una manera en particular respecto uno de otro y asociados con cada punto de red, se le conoce como **motivo o base**. La base debe contener al menos un átomo, pero puede contener muchos átomos de uno o más tipos. En la figura 3-5b) se muestra una base de un átomo. Se obtiene una **estructura cristalina** colocando los átomos de la base en cada punto de red (es decir, la estructura cristalina = la red + la base), como se muestra en la figura 3-5c). En la figura 3-5d) se muestra un cristal unidimensional hipotético que tiene una base de dos átomos distintos. El átomo más grande se ubica en cada punto de red con el átomo más pequeño localizado a una distancia fija sobre el punto de red. Observe que no es necesario que uno de los átomos de la base esté ubicado en cada punto de red, como se muestra en la figura 3-5e). Las figuras 3-5d) y e) representan el mismo cristal unidimensional; los átomos simplemente se desplazan de manera relativa entre sí. Tal desplazamiento no modifica los arreglos atómicos en el cristal.

Sólo existe una manera de arreglar los puntos en una dimensión para que cada punto tenga entornos idénticos: un arreglo de puntos separados por una distancia igual como se explicó anteriormente. Existen cinco maneras distintas de arreglar los puntos en dos dimensiones para que cada punto tenga entornos idénticos: por tanto, existen cinco redes bidimensionales. Sólo existen 14 maneras únicas de arreglar los puntos en tres dimensiones. A estos arreglos tridimensionales únicos de puntos de red se les conoce como **redes de Bravais**, nombradas en honor de Auguste Bravais (1811-1863), quien fue uno de los primeros cristalógrafos franceses.

**Figura 3-5**

Red y base. a) Red unidimensional. Los puntos de red están separados por una distancia igual. b) Una base de un átomo. c) Una estructura cristalina formada colocando la base de b) sobre cada punto de red en a). d) Una estructura cristalina formada colocando una base de dos átomos de distintos tipos en la red en a). e) El mismo cristal que el mostrado en d); sin embargo, la base se ha desplazado con relación a cada punto de red.

En la figura 3-6 se muestran las 14 redes de Bravais. Como se enunció anteriormente, una red es infinita en extensión, por lo que se muestra una sola celda unitaria para cada red. La celda unitaria es la subdivisión de una red que sigue manteniendo las características generales de toda la red. Los puntos de red se localizan en las esquinas de las celdas unitarias y, en algunos casos, en sus caras o el centro de la celda unitaria.

Las 14 redes de Bravais se agrupan en siete **sistemas cristalinos**. Los siete sistemas cristalinos se conocen como cúbico, tetragonal, ortorrómbico, romboédrico (también conocido como trigonal), hexagonal, monoclinico y triclinico. Observe que para el sistema cristalino cúbico se tienen las redes de Bravais cúbica sencilla (CS), cúbica centrada en la cara (CCCa) y cúbica centrada en el cuerpo (CCCu). Estos nombres describen el arreglo de los puntos de red en la celda unitaria. De manera similar, para el sistema cristalino tetragonal, se tienen las redes tetragonal sencilla y tetragonal centrada en el cuerpo. De nuevo recuerde que el concepto de una red es matemático y no menciona átomos, iones o moléculas. Sólo cuando se asocia una base con una red se puede describir una estructura cristalina. Por ejemplo, si se toma la red cúbica centrada en la cara y se posiciona una base de un átomo sobre cada punto de red, se reproduce la estructura cristalina cúbica centrada en la cara.

Observe que aunque sólo se tienen 14 redes de Bravais, se puede tener un número infinito de bases. En la naturaleza se observan o pueden sintetizarse cientos de estructuras cristalinas distintas. Muchos materiales distintos pueden tener la misma estructura cristalina. Por ejemplo, el cobre y el níquel tienen la estructura cristalina cúbica centrada en la cara para la que sólo un átomo está asociado con cada punto de red. En estructuras más complicadas, particularmente los materiales poliméricos, cerámicos y biológicos, se pueden asociar varios átomos con cada punto de red (es decir, la base es mayor a uno), formando celdas unitarias muy complejas.

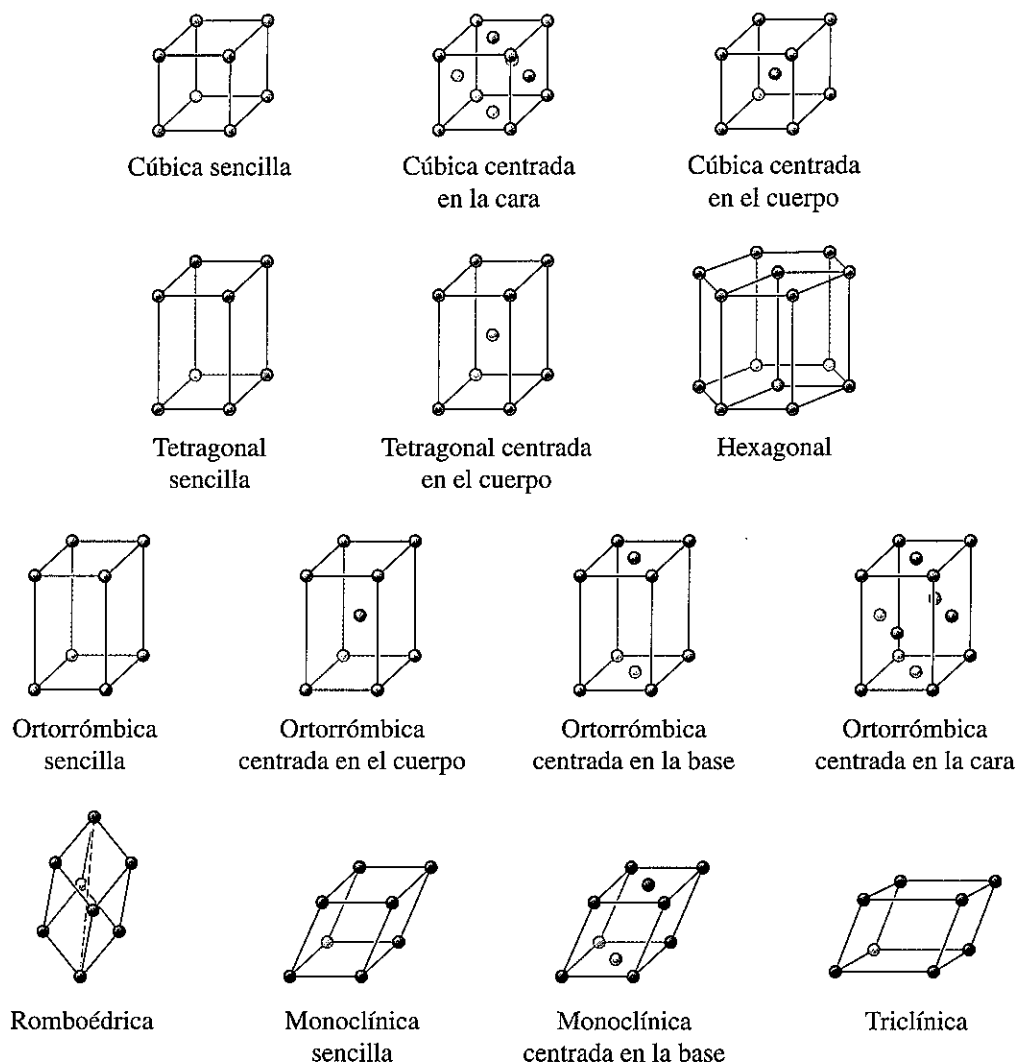


Figura 3-6 Los 14 tipos de redes de Bravais agrupados en los siete sistemas cristalinos. En las figuras 3-8 y 3-13 se muestra la celda unitaria real para un sistema hexagonal.

Celda unitaria El objetivo es desarrollar una notación para modelar sólidos cristalinos que comuniquen de manera sencilla y por completo cómo se arreglan los átomos en el espacio. El concepto de celda unitaria complementa el modelo de red y base para la representación de una estructura cristalina. Aunque las metodologías de los conceptos de red y base y de celda unitaria son un tanto distintos, el resultado final, una descripción de un cristal, es el mismo.

El objetivo al elegir una celda unitaria para una estructura cristalina es encontrar la unidad de repetición sencilla que, cuando se duplica y se traslada, reproduce toda la estructura cristalina. Por ejemplo, imagine el cristal como un rompecabezas tridimensional para el que cada pieza del rompecabezas es exactamente la misma. Si se sabe a qué se parece una pieza del rompecabezas, se sabe a qué se parece todo el rompecabezas y no se tiene que armar todo el rompecabezas para resolverlo. ¡Sólo se necesita una pieza! Para comprender el concepto de celda unitaria, se comienza con el cristal. La figura 3-7a) muestra un cristal bidimensional hipotético que consiste en átomos del mismo tipo.

Después, se adiciona una cuadrícula que imita la simetría de los arreglos de los átomos. Existe un número infinito de posibilidades para la cuadrícula, pero por convención, por lo regular se elige la más sencilla. Para el arreglo cuadrado de átomos mostrado en la figura

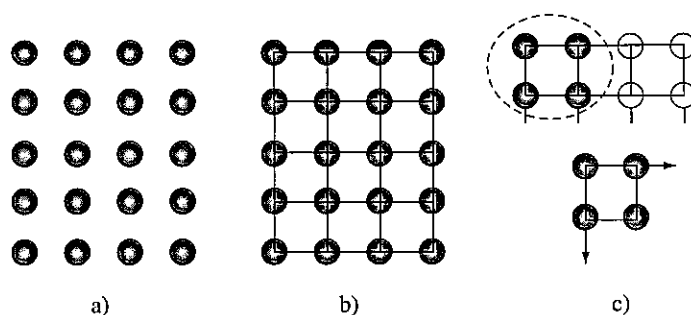


Figura 3-7 Celda unitaria. a) Un cristal bidimensional. b) El cristal con una superposición de una cuadrícula que refleja la simetría del cristal. c) La unidad de repetición de la cuadrícula conocida como la celda unitaria. Cada celda unitaria tiene su propio origen.

3-7a) se elige una cuadrícula cuadrada como se muestra en la figura 3-7b). Después, se selecciona la unidad de repetición de la cuadrícula, la cual también se conoce como celda unitaria. Ésta es la unidad que, cuando se duplica y traslada por medio de múltiples enteros de las longitudes axiales de la celda unitaria, recrea todo el cristal. En la figura 3-7c) se muestra la celda unitaria; observe que por cada celda unitaria, sólo hay un cuarto de un átomo en cada esquina en dos dimensiones. Siempre se dibujarán círculos llenos para representar los átomos, pero se comprende que sólo la fracción del átomo que está contenido dentro de la celda unitaria contribuye al número total de átomos por celda unitaria. Por tanto, hay $1/4$ de átomo/esquina $\times 4$ esquinas = 1 átomo por celda unitaria, como se muestra en la figura 3-7c). También es importante observar que, si hay un átomo en una esquina de la celda unitaria, debe haber un átomo en cada esquina de la celda unitaria para mantener la simetría de traslación. Cada celda unitaria tiene su propio origen, como se muestra en la figura 3-7c).

Parámetros de red y ángulos interaxiales Los parámetros de red son las longitudes o dimensiones axiales de la celda unitaria y se indican por convención como a , b y c . Los ángulos entre las longitudes axiales, conocidos como ángulos interaxiales, se indican por medio de las letras griegas α , β y γ . Por convención, α es el ángulo entre las longitudes b y c , β es el ángulo entre las longitudes a y c y γ es el ángulo entre las longitudes a y b , como se muestra en la figura 3-8. (Observe que para cada combinación hay una letra a , b y c ya sea que se escriban en letras griegas o romanas.)

En un sistema cúbico cristalino sólo se necesita especificar la longitud de uno de los lados del cubo (en ocasiones se designa como a_0). La longitud con frecuencia se da en unidades de nanómetros (nm) o angstrom ($\text{\AA}$), donde

$$1 \text{ nanómetro (nm)} = 10^{-9} \text{ m} = 10^{-7} \text{ cm} = 10 \text{ \AA}$$

$$1 \text{ angstrom (\AA)} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m} = 10^{-8} \text{ cm}$$

En la tabla 3-1 se presentan los parámetros de red y los ángulos interaxiales para las celdas unitarias de los siete sistemas cristalinos.

Para definir por completo una celda unitaria se deben especificar los parámetros de red o razones entre las longitudes axiales, los ángulos interaxiales y las coordenadas atómicas. Al especificar las coordenadas atómicas todos los átomos se colocan en la celda unitaria. Las coordenadas se especifican como fracciones de las longitudes axiales. Por tanto, para la celda bidimensional representada en la figura 3-7c), la celda unitaria se especifica por completo por medio de la siguiente información:

Longitudes axiales: $a = b$

Ángulo interaxial: $\gamma = 90^\circ$

Coordenada atómica: $(0, 0)$

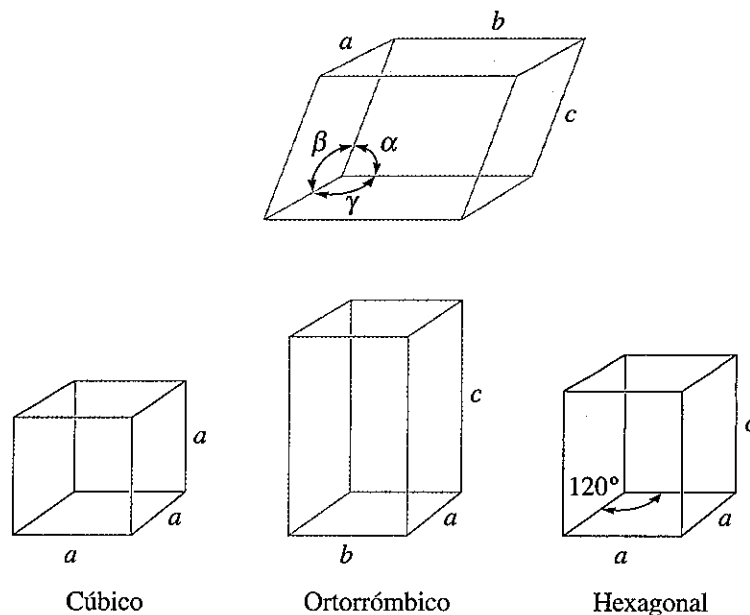


Figura 3-8 Definición de los parámetros de red y su uso en los sistemas cristalinos cúbico, ortorrómbico y hexagonal.

De nuevo, sólo 1/4 del átomo en cada origen (0, 0) contribuye al número de átomos por celda unitaria; sin embargo, cada esquina actúa como un origen y contribuye 1/4 de átomo por esquina para un total de un átomo por celda unitaria. (¿Ve por qué con un átomo en (0, 0) de cada celda unitaria sería repetitivo también dar las coordenadas (1, 0), (0, 1) y (1, 1)?)

De manera similar, una celda unitaria cúbica con un átomo en cada esquina se especifica por completo por medio de la siguiente información:

Longitudes axiales: $a = b = c$

Ángulos interaxiales: $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

Coordenada atómica: (0, 0, 0)

TABLA 3-1 ■ Características de los siete sistemas cristalinos

Estructura	Ejes	Ángulos entre los ejes	Volumen de la celda unitaria
Cúbica	$a = b = c$	Todos los ángulos son de 90° .	a^3
Tetragonal	$a = b \neq c$	Todos los ángulos son de 90° .	a^2c
Ortorrómbica	$a \neq b \neq c$	Todos los ángulos son de 90° .	abc
Hexagonal	$a = b \neq c$	Dos ángulos de 90° . El ángulo entre a y b es de 120° .	$0.866a^2c$
Romboédrica o trigonal	$a = b = c$	Todos los ángulos son iguales y ninguno de 90° .	$a^3\sqrt{1 - 3\cos^2\alpha + 2\cos^3\alpha}$
Monoclínica	$a \neq b \neq c$	Dos ángulos de 90° . Un ángulo (β) no es de 90° .	$abc \sin \beta$
Triclínica	$a \neq b \neq c$	Todos los ángulos son distintos y ninguno de 90° .	$abc\sqrt{1 - \cos^2\alpha - \cos^2\beta - \cos^2\gamma + 2\cos\alpha\cos\beta\cos\gamma}$

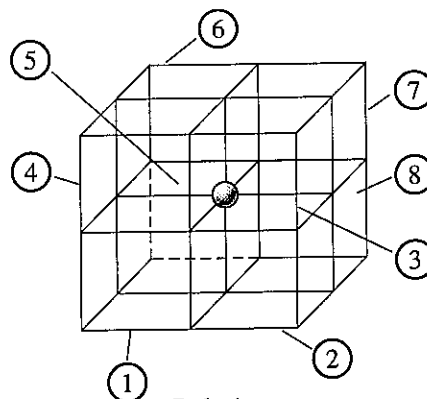
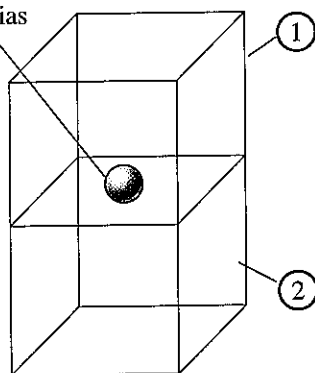
Ahora en tres dimensiones, cada esquina contribuye $1/8$ de átomo por cada una de las ocho esquinas para un total de un átomo por celda unitaria. Observe que el número de coordenadas atómicas requeridas es igual al número de átomos por celda unitaria. Por ejemplo, si hay dos átomos por celda unitaria, con un átomo en las esquinas y un átomo en la posición centrada en el cuerpo, se requieren dos coordenadas atómicas: $(0, 0, 0)$ y $(1/2, 1/2, 1/2)$.

Número de átomos por celda unitaria Cada celda unitaria contiene un número específico de puntos de red. Cuando se cuenta el número de puntos de red que pertenecen a cada celda unitaria, se debe reconocer que, al igual que los átomos, los puntos de red pueden estar compartidos por más de una celda unitaria. Un punto de red en una esquina de una celda unitaria está compartido por siete celdas unitarias adyacentes (por tanto un total de ocho celdas); sólo un octavo de cada esquina pertenece a una celda en particular. Por tanto, el número de puntos de red de todas las posiciones en las esquinas en una celda unitaria es:

$$\left(\frac{1/8 \text{ punto de red}}{\text{esquina}}\right)\left(\frac{8 \text{ esquinas}}{\text{celda}}\right) = \frac{1 \text{ punto de red}}{\text{celda unitaria}}$$

Las esquinas contribuyen $1/8$ de un punto, las caras $1/2$ y las posiciones centradas en el cuerpo, 1 punto [figura 3-9a)].

Átomo centrado en la cara compartido entre dos celdas unitarias

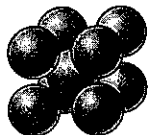


Cada átomo en una esquina es compartido por 8 celdas unitarias (1-4 al frente, 5-8 atrás)

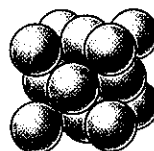
a)



Cúbica sencilla



Cúbica centrada en el cuerpo



Cúbica centrada en la cara

b)

Figura 3-9 a) Ilustración que muestra la compartición de los átomos de la caras y las esquinas. b) Modelos para las celdas unitarias cúbica sencilla (CS), cúbica centrada en el cuerpo (CCCu) y cúbica centrada en la cara (CCCa), suponiendo sólo un átomo por punto de red.

El número de átomos por celda unitaria es el producto del número de átomos por punto de red y el número de puntos de red por celda unitaria. En la figura 3-9b) se muestran las estructuras de las celdas unitarias cúbica sencilla (CS), cúbica centrada en el cuerpo (CCCu) y cúbica centrada en la cara (CCCa) (con un átomo localizado en cada punto de red). El ejemplo 3-1 ilustra cómo se determina el número de puntos de red en los sistemas cristalinos cúbicos.

Ejemplo 3-1

Determinación del número de puntos de red en los sistemas cristalinos cúbicos

Determine el número de puntos de red por celda en los sistemas cristalinos cúbicos. Si sólo hay un átomo localizado en cada punto de red, calcule el número de átomos por celda unitaria.

SOLUCIÓN

En la celda unitaria CS, los puntos de red sólo están localizados en las esquinas del cubo:

$$\frac{\text{puntos de red}}{\text{celda unitaria}} = (8 \text{ esquinas})\left(\frac{1}{8}\right) = 1$$

En las celdas unitarias CCCu, los puntos de red están localizados en las esquinas y en el centro del cubo:

$$\frac{\text{puntos de red}}{\text{celda unitaria}} = (8 \text{ esquinas})\left(\frac{1}{8}\right) + (1 \text{ centrado en el cuerpo})(1) = 2$$

En las celdas unitarias CCCa, los puntos de red están localizados en las esquinas y en las caras del cubo:

$$\frac{\text{puntos de red}}{\text{celda unitaria}} = (8 \text{ esquinas})\left(\frac{1}{8}\right) + (6 \text{ caras})\left(\frac{1}{2}\right) = 4$$

Dado que se supone que sólo está localizado un átomo en cada punto de red, el número de átomos por celda unitaria sería de 1, 2 y 4, para las celdas unitarias cúbica sencilla, cúbica centrada en el cuerpo y cúbica centrada en la cara, respectivamente.

Ejemplo 3-2

Estructura del cloruro de cesio

A las estructuras cristalinas por lo general se les asignan los nombres de un elemento o compuesto representativo que tiene esa estructura. El cloruro de cesio (CsCl) es un compuesto iónico cristalino. En la figura 3-10 se muestra una celda unitaria de la estructura cristalina del CsCl. Los aniones cloruro se localizan en las esquinas de la celda unitaria y el catión cesio lo hace en la posición centrada en el cuerpo de cada celda unitaria. Describa esta estructura como una red y base y también defina por completo la celda unitaria para el cloruro de cesio.

SOLUCIÓN

La celda unitaria es cúbica; por tanto, la red es CS, CCCa o CCCu. No hay átomos localizados en las posiciones centradas en la cara; por tanto la red es CS o CCCu. Cada anión Cl está rodeado por ocho cationes Cs en las posiciones centradas en el cuerpo de

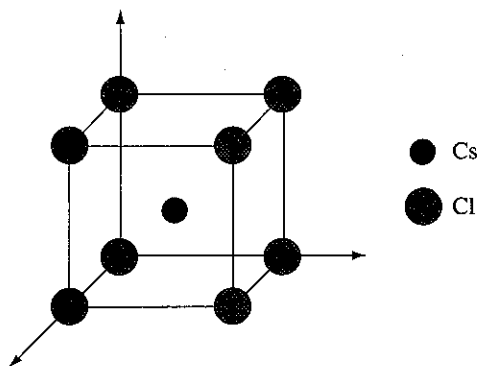


Figura 3-10

Estructura cristalina del CsCl. Nota: Los tamaños de los iones no están a escala.

las celdas unitarias adyacentes. Cada catión Cs está rodeado por ocho aniones Cl en las esquinas de la celda unitaria. Por tanto, la esquina y las posiciones centradas en el cuerpo no tienen entornos idénticos; por tanto, no pueden ser puntos de red. La red debe ser cúbica sencilla.

La red cúbica sencilla sólo tiene puntos de red en las esquinas de la celda unitaria. La estructura cristalina del cloruro de cesio puede describirse como una red cúbica sencilla con una base de dos átomos, Cl (0, 0, 0) y Cs (1/2, 1/2, 1/2). Observe que las coordenadas atómicas se listan como fracciones de las longitudes axiales, las cuales son iguales para una estructura cristalina cúbica. El átomo base de Cl (0, 0, 0) colocado en cada punto de red (es decir, cada esquina de la celda unitaria) explica por completo cada átomo de Cl en la estructura. El átomo base de Cs (1/2, 1/2, 1/2) localizado en la posición centrada en el cuerpo con respecto a cada punto de red, explica por completo cada átomo de Cs en la estructura.

Por tanto hay dos átomos por celda unitaria en el CsCl:

$$\frac{1 \text{ punto de red}}{\text{celda unitaria}} * \frac{2 \text{ átomos}}{\text{punto de red}} = \frac{2 \text{ átomos}}{\text{celda unitaria}}$$

Para definir por completo una celda unitaria se deben especificar los parámetros de red o razones entre las longitudes axiales, los ángulos interaxiales y las coordenadas atómicas. La celda unitaria del CsCl es cúbica; por tanto

$$\text{Longitudes axiales: } a = b = c$$

$$\text{Ángulos interaxiales: } \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

Los aniones Cl están localizados en las esquinas de la celda unitaria y los cationes Cs están ubicados en las posiciones centradas en el cuerpo. Por tanto,

$$\text{Coordenadas atómicas: Cl (0, 0, 0) y Cs (1/2, 1/2, 1/2)}$$

Al contar los átomos por celda unitaria,

$$\frac{8 \text{ esquinas}}{\text{celda unitaria}} * \frac{1/8 \text{ de átomo de Cl}}{\text{esquina}} + \frac{1 \text{ centrado en el cuerpo}}{\text{celda unitaria}} * \frac{1 \text{ átomo de Cs}}{\text{centrado en el cuerpo}} = \frac{2 \text{ átomos}}{\text{celda unitaria}}$$

Como se espera, el número de átomos por celda unitaria es el mismo sin importar el método empleado para contar los átomos.

Radio atómico en función del parámetro de red Las direcciones en la celda unitaria a lo largo de las cuales los átomos están en contacto continuo son las **direcciones compactas**. En las estructuras sencillas, particularmente en aquellas con sólo un átomo por punto de red, se utilizan estas direcciones para calcular la relación entre el tamaño aparente del átomo y el tamaño de la celda unitaria. Al determinar de manera geométrica la longitud de la dirección con relación a los parámetros de red y después adicionando el número de **radios atómicos** a lo largo de esta dirección, se puede determinar la relación deseada. El ejemplo 3-3 ilustra cómo se determinan las relaciones entre los parámetros de red y el radio atómico.

Ejemplo 3-3

Determinación de la relación entre el radio atómico y los parámetros de red

Determine la relación entre el radio atómico y el parámetro de red en las estructuras CS, CCCu y CCCa cuando se localiza un átomo en cada punto de red.

SOLUCIÓN

Si se refiere a la figura 3-11, se encuentra que los átomos se tocan a lo largo de la arista del cubo en las estructuras CS. Los átomos en las esquinas están centrados en las esquinas del cubo, por lo que

$$a_0 = 2r \quad (3-1)$$

En una estructura CCCu, los átomos se tocan a lo largo de la diagonal del cuerpo, la cual es de $\sqrt{3}a_0$ de longitud. Hay dos radios atómicos del átomo centrado y un radio atómico de cada uno de los átomos en las esquinas en la diagonal del cuerpo, por lo que

$$a_0 = \frac{4r}{\sqrt{3}} \quad (3-2)$$

En una estructura CCCa, los átomos se tocan a lo largo de la diagonal de la cara del cubo, la cual es de $\sqrt{2}a_0$ de longitud. Existen cuatro radios atómicos a lo largo de esta longitud—dos radios del átomo centrado en la cara y un radio de cada esquina, por lo que

$$a_0 = \frac{4r}{\sqrt{2}} \quad (3-3)$$

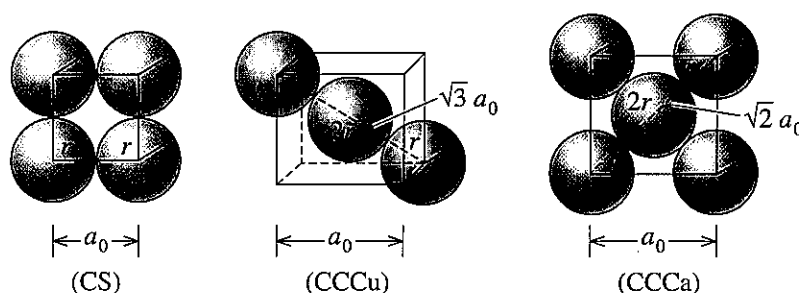


Figura 3-11 Relaciones entre el radio atómico y el parámetro de red en los sistemas cúbicos (para el ejemplo 3-3).

Red hexagonal y celda unitaria La imagen de la red hexagonal en la figura 3-6 refleja la simetría subyacente de la red, pero a diferencia de las demás imágenes en la figura 3-6, no representa la celda unitaria de la red. En la figura 3-8 se muestra la celda unitaria hexagonal. Si estudia la imagen de la red hexagonal en la figura 3-6, puede encontrar la celda unitaria hexagonal. Los parámetros de red para la celda unitaria hexagonal son

Longitudes axiales: $a = b \neq c$

Ángulos interaxiales: $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$

Cuando los átomos de la celda unitaria sólo están localizados en las esquinas, la coordenada atómica es (0, 0, 0).

Número de coordinación El número de coordinación es el número de átomos que tocan un átomo en particular, o el número de los vecinos más cercanos para ese átomo en particular. Ésta es una indicación de qué tan estrecha y eficientemente están empaquetados los átomos entre sí. Para sólidos iónicos, el número de coordinación de los cationes se define como el número de aniones más cercanos. El número de coordinación de los aniones es el número de cationes más cercanos. En la sección 3-7 se explicarán las estructuras cristalinas de los distintos sólidos iónicos y otros materiales.

En las estructuras cúbicas que sólo contienen un átomo por punto de red, los átomos tienen un número de coordinación relacionado con la estructura de red. Por inspección de las celdas unitarias en la figura 3-12, se ve que cada átomo en la estructura CS tiene un número de coordinación de seis, mientras que cada átomo en la estructura CCCu tiene ocho vecinos más cercanos. En la sección 3-5, se mostrará que cada átomo en la estructura CCCa tiene un número de coordinación de 12, el cual es el máximo.

Factor de empaquetamiento El factor de empaquetamiento o fracción de empaquetamiento atómico es la fracción del espacio ocupado por los átomos, suponiendo que los átomos son esferas duras. La expresión general para el factor de empaquetamiento es:

$$\text{Factor de empaquetamiento} = \frac{(\text{número de átomos/celda})(\text{volumen de cada átomo})}{\text{volumen de la celda unitaria}} \quad (3-4)$$

El ejemplo 3-4 ilustra cómo se calcula el factor de empaquetamiento para la celda unitaria CCCa.

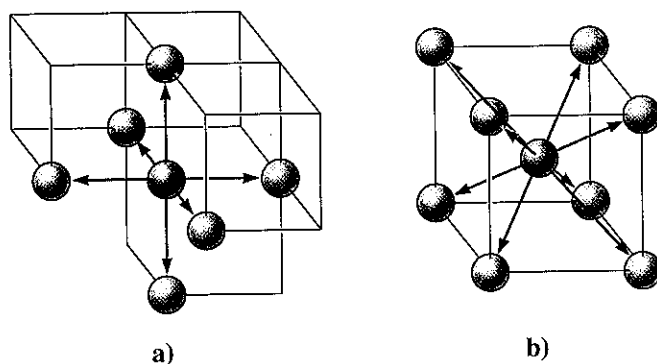


Figura 3-12 Ilustración del número de coordinación en las celdas unitarias a) CS y b) CCCu. Seis átomos tocan cada átomo en la celda unitaria CS, mientras que ocho átomos tocan cada átomo en la celda unitaria CCCu.

Ejemplo 3-4*Cálculo del factor de empaquetamiento*

Calcule el factor de empaquetamiento para la celda unitaria CCCa.

SOLUCIÓN

En la celda unitaria CCCa, hay cuatro puntos de red por celda, si hay un átomo por punto de red, también hay cuatro átomos por celda. El volumen de un átomo es $\frac{4\pi r^3}{3}$ y el volumen de la celda unitaria es a_0^3 , donde r es el radio del átomo y a_0 es el parámetro de red

$$\text{Factor de empaquetamiento} = \frac{4 \text{ átomos/celda} \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right)}{a_0^3}$$

Dado que para las celdas unitarias CCCa, $a_0 = 4r/\sqrt{2}$:

$$\text{Factor de empaquetamiento} = \frac{(4) \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right)}{(4r/\sqrt{2})^3} = \frac{\pi}{\sqrt{18}} \approx 0.74$$

El factor de empaquetamiento de $\pi/\sqrt{18} \approx 0.74$ en la celda unitaria CCCa es el empaquetamiento más eficiente posible. Las celdas CCCu tienen un factor de empaquetamiento de 0.68 y las celdas CS tienen un factor de empaquetamiento de 0.52. Observe que el factor de empaquetamiento es independiente del radio de los átomos, siempre que se suponga que todos los átomos tienen un radio fijo. Lo que esto significa es que no importa si los átomos se empaquetan en celdas unitarias o en balones de basquetbol o en pelotas de tenis de mesa en una caja cúbica. ¡El factor de empaquetamiento máximo alcanzable es $\pi/\sqrt{18}$! A este concepto de geometría discreta se le conoce como **conjetura de Kepler**. Johannes Kepler propuso esta conjetura en 1611 y siguió siendo una conjetura sin comprobar hasta 1998 cuando Thomas C. Hales demostró que en realidad es verdadera.

El arreglo CCCa representa una **estructura compacta (C)** (es decir, la fracción de empaquetamiento es la más alta posible con átomos de un tamaño). Las estructuras CS y CCCu son relativamente abiertas. En la siguiente sección se verá que es posible tener una estructura hexagonal que tenga la misma eficiencia de empaquetamiento que la estructura CCCa. A esta estructura se le conoce como estructura compacta hexagonal (CH). Los metales con sólo enlace metálico están empaquetados lo más eficiente posible. Los metales con enlace mixto, como el hierro, pueden tener celdas unitarias menores al factor de empaquetamiento máximo. Por lo general no se encuentran metales o aleaciones de ingeniería que tengan la estructura CS, aunque esta estructura se encuentra en los materiales cerámicos.

Densidad La densidad teórica de un material puede calcularse utilizando las propiedades de la estructura cristalina. La fórmula general es

$$\text{Densidad } \rho = \frac{(\text{número de átomos/celda})(\text{masa atómica})}{(\text{volumen de la celda unitaria})(\text{constante de Avogadro})} \quad (3-5)$$

Si un material es iónico y consiste en distintos tipos de átomos o iones, tendrá que modificarse esta fórmula para que refleje estas diferencias. El ejemplo 3-5 ilustra cómo se determina la densidad del hierro CCCu.

Ejemplo 3-5*Determine la densidad del hierro CCCu*

Determine la densidad del hierro CCCu, el cual tienen un parámetro de red de 0.2866 nm.

SOLUCIÓN

Para una celda CCCu,

$$\text{Átomos/celda} = 2$$

$$a_0 = 0.2866 \text{ nm} = 2.866 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

$$\text{Masa atómica} = 55.847 \text{ g/mol}$$

$$\text{Volumen de la celda unitaria} = a_0^3 = (2.866 \times 10^{-8} \text{ cm})^3 = 23.54 \times 10^{-24} \text{ cm}^3/\text{celda}$$

$$\text{Constante de Avogadro } N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ átomos/mol}$$

$$\text{Densidad } \rho = \frac{(\text{número de átomos/celda})(\text{masa atómica del hierro})}{(\text{volumen de la celda unitaria})(\text{constante de Avogadro})}$$

$$\rho = \frac{(2)(55.847)}{(23.54 \times 10^{-24})(6.022 \times 10^{23})} = 7.879 \text{ g/cm}^3$$

La densidad medida es de 7.870 g/cm³. La ligera discrepancia entre las densidades teórica y medida es consecuencia de los defectos en el material. Como se mencionó anteriormente, el término "defecto" en este contexto se refiere a las imperfecciones con respecto al arreglo atómico.

Estructura compacta hexagonal En la figura 3-13 se muestra la estructura compacta hexagonal (CH). La red es hexagonal con una base de dos átomos del mismo tipo: uno localizado en (0, 0, 0) y otro en (2/3, 1/3, 1/2). (Estas coordenadas siempre son fracciones de las longitudes axiales a , b y c incluso si las longitudes axiales no son iguales.) La red hexagonal tiene un punto de red por celda unitaria localizado en las esquinas de la celda unitaria. En la estructura CH, dos átomos están asociados con cada punto de red; por tanto, hay dos átomos por celda unitaria.

Una representación igualmente válida de la estructura cristalina CH es una red hexagonal con una base de dos átomos del mismo tipo: uno localizado en (0, 0, 0) y otro en (1/3, 2/3, 1/2). Las coordenadas (2/3, 1/3, 1/2) y (1/3, 2/3, 1/2) son equivalentes, lo que significa que no pueden distinguirse entre sí.

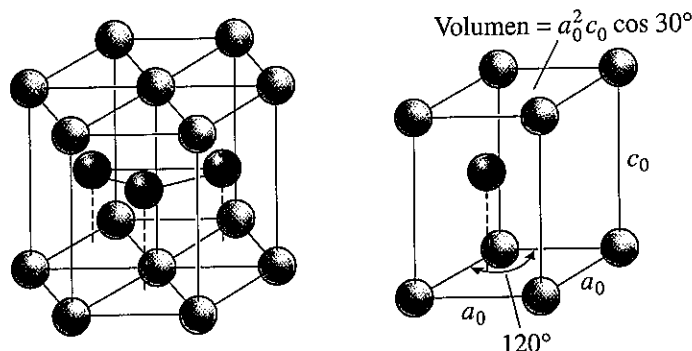


Figura 3-13 Estructura compacta hexagonal (CH) (izquierda) y su celda unitaria.

TABLA 3-2 ■ Características de las estructuras cristalinas de algunos metales a temperatura ambiente

Estructura	a_0 en función de r	Átomos por celda	Número de coordinación	Factor de empaquetamiento	Ejemplos
Cúbica sencilla (CS)	$a_0 = 2r$	1	6	0.52	Polonio (Po), α -Mo
Cúbica centrada en el cuerpo (CCCu)	$a_0 = 4r/\sqrt{3}$	2	8	0.68	Fe, W, Mo, Nb, Ta, K, Na, V, Cr
Cúbica centrada en la cara (CCCa)	$a_0 = 4r/\sqrt{2}$	4	12	0.74	Cu, Au, Pt, Ag, Pb, Ni
Estructura compacta hexagonal (CH)	$a_0 = 2r$ $c_0 \approx 1.633a_0$	2	12	0.74	Ti, Mg, Zn, Be, Co, Zr, Cd

En los metales con una estructura CH ideal los ejes a_0 y c_0 están relacionados por la razón $c_0/a_0 = \sqrt{8/3} = 1.633$. Sin embargo, la mayoría de los metales CH tienen razones c_0/a_0 que difieren ligeramente del valor ideal debido al enlace mixto. Debido a que la estructura CH, como la estructura CCCa, tiene el factor de empaquetamiento más eficiente de 0.74 y un número de coordinación de 12, varios metales poseen esta estructura. La tabla 3-2 resume las características de las estructuras cristalinas de algunos metales.

Las estructuras de los metales enlazados de manera iónica pueden verse como formados por medio del empaquetamiento (cúbico o hexagonal) de los aniones. Los cationes entran en los sitios u orificios intersticiales que quedan después del empaquetamiento de los aniones. La sección 3-7 explica esto con mayor detalle.

3-4 Transformaciones alotrópicas y polimórficas

A los materiales con más de una estructura cristalina se les llama alotrópicos o polimórficos. El término **alotropía** por lo general se reserva para este comportamiento en los elementos puros, mientras que el término **polimorfismo** se utiliza para los compuestos. En el capítulo 2 se explicaron los alótropos del carbono. Algunos metales, como el hierro y el titanio, tienen más de una estructura cristalina. A temperatura ambiente, el hierro tiene la estructura CCCu, pero a temperaturas más altas el hierro se transforma en una estructura CCCa. Estas transformaciones resultan en cambios en las propiedades de los materiales y forman la base para el tratamiento térmico de los aceros y muchas otras aleaciones.

Muchos materiales cerámicos, como la sílice (SiO_2) y la zirconia (ZrO_2), también son polimórficos. La transformación puede estar acompañada por un cambio en el volumen durante el calentamiento o el enfriamiento; si no se controla de manera apropiada, este cambio en el volumen ocasiona que el material cerámico se resquebraje y falle. Por ejemplo, para la zirconia (ZrO_2) la forma más estable a temperatura ambiente ($\sim 25^\circ\text{C}$) es monoclinica. A medida que se incrementa la temperatura, más estructuras cristalinas simétricas se vuelven estables. A 1170°C , la zirconia monoclinica se transforma en una estructura tetragonal. La forma tetragonal es estable hasta 2370°C . A esa temperatura, la zirconia se transforma en una forma cúbica. La forma cúbica permanece estable de 2370°C a una temperatura de fusión de 2680°C . La zirconia también puede tener la forma ortorrómbica cuando se aplican presiones altas.

Los componentes de cerámica fabricados a partir de zirconia pura por lo general se fracturarán a medida que se disminuye la temperatura y a medida que la zirconia se transforma de la forma tetragonal a la monoclinica debido a la expansión del volumen (el cambio de fase cúbica a tetragonal no ocasiona un cambio mayor en el volumen). Como resultado, los polimorfos puros monoclinico y tetragonal de la zirconia no se utilizan. En su lugar, los científicos e ingenieros de materiales han encontrado que la adición de dopantes como la itria (Y_2O_3) hace posible estabilizar la fase cúbica de la zirconia, incluso a temperatura ambiente. La zirconia estabilizada por la itria (ZEI) contiene hasta 8% mol de Y_2O_3 . Las formulaciones de la zirconia estabilizada se utilizan en muchas aplicaciones, incluyendo recubrimientos de barrera térmicos (RBT) para álabes de turbinas y electrolitos para sensores de oxígeno y celdas de combustible de óxido sólido. Virtualmente cada automóvil en la actualidad utiliza un sensor

de oxígeno que se fabrica utilizando composiciones de zirconia estabilizada. El ejemplo 3-6 ilustra cómo calcular los cambios en el volumen en los polimorfos de la zirconia.

Ejemplo 3-6

Cálculo de los cambios en el volumen en los polimorfos de la zirconia

Calcule el cambio porcentual en el volumen a medida que la zirconia se transforma de una estructura tetragonal a una monoclinica [9]. Las constantes de red para las celdas unitarias monoclinicas son: $a = 5.156$, $b = 5.191$ y $c = 5.304$ Å, respectivamente. El ángulo β para la celda unitaria monoclinica es de 98.9° . Las constantes de red para la celda unitaria tetragonal son $a = 5.094$ y $c = 5.304$ Å [10]. ¿La zirconia se expande o se contrae durante esta transformación? ¿Cuál es la implicación de esta transformación sobre las propiedades mecánicas de las cerámicas de zirconia?

SOLUCIÓN

A partir de la tabla 3-1, el volumen de una celda unitaria tetragonal está dado por

$$V = a^2c = (5.094)^2(5.304) = 137.63 \text{ Å}^3$$

y el volumen de una celda unitaria monoclinica está dado por

$$V = abc \sin \beta = (5.156)(5.191)(5.304) \sin(98.9) = 140.25 \text{ Å}^3$$

Por tanto, hay una expansión de la celda unitaria a medida que la ZrO_2 se transforma de una forma tetragonal a una monoclinica.

$$\text{Cambio porcentual en el volumen} = (\text{volumen final} - \text{volumen inicial}) / (\text{volumen inicial}) * 100 = (140.25 - 137.63 \text{ Å}^3) / 137.63 \text{ Å}^3 * 100 = 1.9\%$$

La mayoría de las cerámicas son muy quebradizas y no pueden soportar un cambio en el volumen mayor a 0.1% (en los capítulos 6, 7 y 8 se explicará el comportamiento mecánico de los materiales). La conclusión aquí es que las cerámicas de ZrO_2 no se pueden utilizar en su forma monoclinica dado que, cuando la zirconia se transforma a la forma tetragonal, lo más probable es que se fracture. Por tanto, la ZrO_2 con frecuencia se estabiliza en una forma cúbica utilizando distintos aditivos como el CaO , el MgO y la Y_2O_3 .

3-5**Puntos, direcciones y planos en la celda unitaria**

Puntos de coordinación Se pueden localizar ciertos puntos, como las posiciones de los átomos, en la red o celda unitaria construyendo el sistema coordenado ortonormal de la figura 3-14. La distancia se mide en términos del número de parámetros de red que deben moverse en cada una de las coordenadas x , y y z para obtenerla del origen al punto en cuestión. Las coordenadas se escriben como las tres distancias, con comas separando los números.

Direcciones en la celda unitaria Ciertas direcciones en la celda unitaria son de particular importancia. Los **índices de Miller** para las direcciones son la notación abreviada utilizada para describir estas direcciones. A continuación se da el procedimiento para encontrar los índices de Miller para las direcciones:

1. Utilizando un sistema coordenado ortonormal, determine las coordenadas de dos puntos que se encuentran en la dirección.
2. Reste las coordenadas del punto de la "cola" de las coordenadas del punto de la "cabeza" para obtener el número de parámetros de red recorridos en la dirección de cada eje del sistema coordenado.

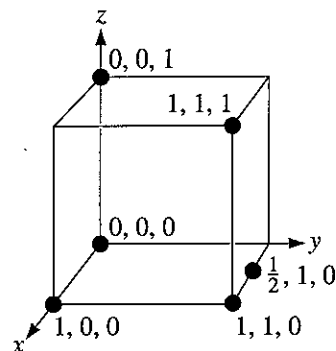


Figura 3-14

Coordenadas de los puntos seleccionados en la celda unitaria. El número se refiere a la distancia del origen en términos de los parámetros de red.

3. Elimine las fracciones y/o reduzca los resultados obtenidos de la resta a los enteros más bajos.
4. Encierre entre corchetes $[]$ los números. Si se produce un signo negativo, represente el signo negativo con una barra sobre el número.

El ejemplo 3-7 ilustra una manera de determinar los índices de Miller de las direcciones.

Ejemplo 3-7

Determinación de los índices de Miller de las direcciones

Determine los índices de Miller de las direcciones A , B y C en la figura 3-15.

SOLUCIÓN

Dirección A

1. Dos puntos son $1, 0, 0$ y $0, 0, 0$
2. $1, 0, 0 - 0, 0, 0 = 1, 0, 0$
3. No hay que eliminar fracciones o reducir enteros
4. $[100]$

Dirección B

1. Dos puntos son $1, 1, 1$ y $0, 0, 0$
2. $1, 1, 1 - 0, 0, 0 = 1, 1, 1$
3. No hay que eliminar fracciones o reducir enteros
4. $[111]$

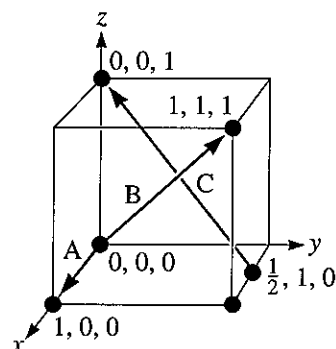


Figura 3-15

Direcciones y coordenadas cristalográficas (para el ejemplo 3-7).

Dirección C

1. Dos puntos son $0, 0, 1$ y $\frac{1}{2}, 1, 0$
2. $0, 0, 1 - \frac{1}{2}, 1, 0 = -\frac{1}{2}, -1, 1$
3. $2(-\frac{1}{2}, -1, 1) = -1, -2, 2$
4. $[\bar{1}\bar{2}2]$

Deben observarse varios puntos acerca del uso de los índices de Miller para las direcciones:

1. Debido a que las direcciones son vectores, una dirección y su negativo no son idénticos; $[100]$ no es igual a $[\bar{1}00]$. Representan la misma línea, pero en direcciones opuestas.
2. Una dirección y su múltiplo son *idénticos*; $[100]$ es la misma dirección que $[200]$.
3. Ciertos grupos de direcciones son *equivalentes*; tienen sus índices particulares debido a la forma en que se construyen las coordenadas. Por ejemplo, en un sistema cúbico, una dirección $[100]$ es una dirección $[010]$ si se redefine el sistema coordenado como se muestra en la figura 3-16. Puede referirse a los grupos de direcciones equivalentes como **direcciones de una forma** o **familia**. Se utilizan corchetes especiales $\langle \rangle$ para indicar esta colección de direcciones. En la tabla 3-3 se listan todas las direcciones de la forma $\langle 110 \rangle$. Se espera que un material tenga las mismas propiedades en cada una de estas 12 direcciones de la forma $\langle 110 \rangle$.

Importancia de las direcciones cristalográficas Las direcciones cristalográficas se utilizan para indicar una orientación particular de un monocristal o de un material policristalino orientado. El conocimiento de cómo describirlas puede ser útil en muchas aplicaciones. Por ejemplo, los metales se deforman con mayor facilidad en las direcciones a lo largo de las cuales los átomos están en mayor contacto. Otro ejemplo en el mundo real es la dependencia en las direcciones cristalográficas de las propiedades magnéticas del hierro y otros materiales magnéticos. Es mucho más sencillo magnetizar el hierro en la dirección $[100]$ en comparación con las direcciones $[111]$ o $[110]$. Por eso es que los granos en los aceros de Fe-Si utilizados en aplicaciones magnéticas (por ejemplo, núcleos de transformadores) están orientados en las direcciones $[100]$ o equivalentes.

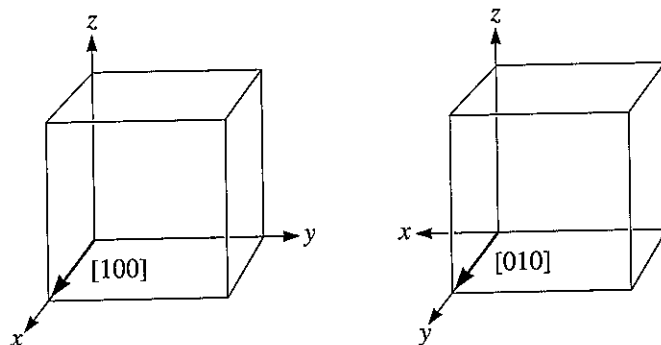


Figura 3-16 Equivalencia de las direcciones cristalográficas de una forma en los sistemas cúbicos.

TABLA 3-3 ■ Direcciones de la forma $\langle 110 \rangle$ en los sistemas cúbicos

$$\langle 110 \rangle = \begin{cases} [110] [\bar{1}\bar{1}0] \\ [101] [\bar{1}0\bar{1}] \\ [011] [0\bar{1}\bar{1}] \\ [1\bar{1}0] [\bar{1}10] \\ [10\bar{1}] [\bar{1}01] \\ [01\bar{1}] [0\bar{1}1] \end{cases}$$

Distancia repetitiva, densidad lineal y fracción de empaquetamiento

Otra manera de caracterizar las direcciones es por medio de la **distancia repetitiva** o la distancia entre los puntos de red a lo largo de la dirección. Por ejemplo, se puede examinar la dirección $[110]$ en una celda unitaria CCCa (figura 3-17); si se comenzara en la localización 0, 0, 0, el siguiente punto de red está en el centro de una cara o un sitio $1/2, 1/2, 0$. La distancia entre los puntos de red es por tanto un medio de la diagonal de la cara o $\frac{1}{2}\sqrt{2}a_0$. En el cobre, el cual tiene un parámetro de red de 0.3615 nm, la distancia repetitiva es de 0.2556 nm.

La **densidad lineal** es el número de puntos de red por unidad de longitud a lo largo de la dirección. En el cobre, hay dos distancias repetitivas a lo largo de la dirección $[110]$ en cada celda unitaria; dado que esta distancia es $\sqrt{2}a_0 = 0.5112$ nm, entonces:

$$\text{Densidad lineal} = \frac{2 \text{ distancias repetitivas}}{0.5112 \text{ nm}} = 3.91 \text{ puntos de red/nm}$$

Observe que la densidad lineal también es el recíproco de la distancia repetitiva.

Por último, se puede calcular la **fracción de empaquetamiento** de una dirección en particular o la fracción cubierta en realidad por los átomos. Para el cobre, en el que se localiza un átomo en cada punto de red, esta fracción es igual al producto de la densidad lineal y el doble del radio atómico. Para la dirección $[110]$ en el cobre CCCa, el radio atómico es $r = \sqrt{2}a_0/4 = 0.1278$ nm. Por tanto; la fracción de empaquetamiento es:

$$\begin{aligned} \text{Fracción de empaquetamiento} &= (\text{densidad lineal})(2r) \\ &= (3.91)(2)(0.1278) \\ &= (1.0) \end{aligned}$$

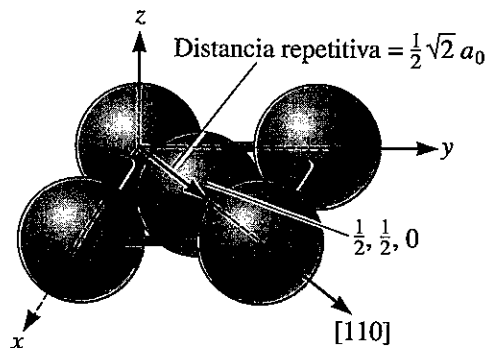


Figura 3-17
Determinación de la distancia repetitiva, la densidad lineal y la fracción de empaquetamiento para una dirección $[110]$ en el cobre CCCa.

Los átomos se tocan a lo largo de la dirección $[110]$, dado que la dirección $[110]$ es compacta en los metales CCCa.

Planos en la celda unitaria Ciertos planos de átomos en un cristal también tienen importancia particular. Por ejemplo, los metales se deforman a lo largo de los planos de los átomos en los que están lo más compactamente posible. La energía superficial de las distintas caras de un cristal depende de los planos cristalográficos particulares. Esto se vuelve importante en el crecimiento de los cristales. En el crecimiento de películas delgadas de ciertos materiales electrónicos (por ejemplo, el Si o el GaAs), se necesita asegurar que el sustrato esté orientado de tal manera que la película delgada pueda crecer sobre un plano cristalográfico en particular.

Se utilizan índices de Miller como notación abreviada para identificar estos planos importantes, como se describe en el siguiente procedimiento.

1. Identifique los puntos en los que el plano interseca las coordenadas x , y y z en términos del número de parámetros de red. Si el plano pasa a través del origen, debe moverse el origen del sistema coordenado al de una celda unitaria adyacente.
2. Tome los recíprocos de estas intersecciones.
3. Elimine fracciones pero no reduzca a los enteros más bajos.
4. Encierre entre paréntesis $()$ los números resultantes. De nuevo, debe escribir los números negativos con una barra sobre el número.

El siguiente ejemplo muestra cómo pueden obtenerse los índices de Miller de los planos.

Ejemplo 3-8

Determine los índices de Miller de los planos A , B y C en la figura 3-18.

SOLUCIÓN

Plano A

1. $x = 1, y = 1, z = 1$
2. $\frac{1}{x} = 1, \frac{1}{y} = 1, \frac{1}{z} = 1$
3. No hay que eliminar fracciones
4. (111)

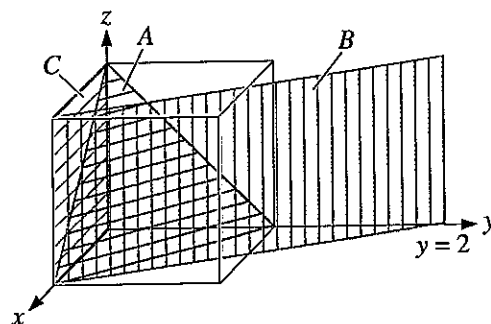


Figura 3-18
Planos e intersecciones cristalográficas
(para el ejemplo 3-8).

Plano B

1. El plano nunca interseca el eje z , por lo que $x = 1, y = 2$ y $z = \infty$
2. $\frac{1}{x} = 1, \frac{1}{y} = \frac{1}{2}, \frac{1}{z} = 0$
3. Eliminando fracciones: $\frac{1}{x} = 2, \frac{1}{y} = 1, \frac{1}{z} = 0$
4. (210)

Plano C

1. Se debe mover el origen, dado que el plano pasa a través de 0, 0, 0. Se mueve el origen un parámetro de red en la dirección y . Entonces, $x = \infty, y = -1$ y $z = \infty$.
2. $\frac{1}{x} = 0, \frac{1}{y} = -1, \frac{1}{z} = 0$
3. No hay que eliminar fracciones
4. (0 $\bar{1}$ 0)

Deben observarse varios aspectos importantes de los índices de Miller para los planos:

1. Los planos y sus negativos son idénticos (esto no fue el caso para las direcciones), debido a que son paralelos. Por tanto, (020) = (0 $\bar{2}$ 0).
2. Los planos y sus múltiplos no son idénticos (de nuevo, esto es lo opuesto de lo que se encontró para las direcciones). Se puede mostrar esto definiendo las densidades planares y las fracciones de empaquetamiento planares. La **densidad planar** es el número de átomos por unidad de área con centros que se encuentran en el plano; la fracción de empaquetamiento es la fracción del área de ese plano cubierta en realidad por esos átomos. El ejemplo 3-9 muestra cómo pueden calcularse éstas.
3. En cada celda unitaria los **planos de una forma o familia** representan los grupos de planos equivalentes que tienen sus índices particulares debido a la orientación de las coordenadas. Se representan estos grupos de planos similares con la notación $\{ \}$. En la tabla 3-4 se muestran los planos de una forma $\{110\}$ en los sistemas cúbicos.
4. En los sistemas cúbicos una dirección que tiene los mismos índices que un plano es perpendicular a ese plano.

TABLA 3-4 ■ Planos de la forma $\{110\}$ en los sistemas cúbicos

$$\{110\} \begin{cases} (110) \\ (101) \\ (011) \\ (1\bar{1}0) \\ (10\bar{1}) \\ (01\bar{1}) \end{cases}$$

Nota: Los negativos de los planos no son planos únicos.

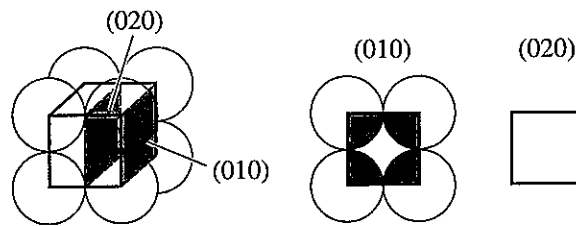
Ejemplo 3-9

Calcule la densidad planar y la fracción de empaquetamiento planar para los planos (010) y (020) en el polonio cúbico sencillo, el cual tiene un parámetro de red de 0.334 nm.

SOLUCIÓN

En la figura 3-19 están trazados los dos planos. En el plano (010), los átomos están centrados en cada esquina de la cara del cubo, con 1/4 de cada átomo en realidad en la cara de la celda unitaria. Por tanto, los átomos totales en cada cara es uno. La densidad planar es:

$$\begin{aligned}\text{Densidad planar (010)} &= \frac{\text{átomos por cara}}{\text{área de la cara}} = \frac{1 \text{ átomo por cara}}{(0.334)^2} \\ &= 8.96 \text{ átomos/nm}^2 = 8.96 \times 10^{14} \text{ átomos/cm}^2\end{aligned}$$

**Figura 3-19**

Las densidades planares de los planos (010) y (020) en las celdas unitarias CS no son idénticas (para el ejemplo 3-9).

La fracción de empaquetamiento planar está dada por:

$$\begin{aligned}\text{Fracción de empaquetamiento (010)} &= \frac{\text{área de los átomos por cara}}{\text{área de la cara}} = \frac{(1 \text{ átomo})(\pi r^2)}{(a_0)^2} \\ &= \frac{\pi r^2}{(2r)^2} = 0.79\end{aligned}$$

Ningún átomo está centrado en los planos (020). Por tanto, la densidad planar y la fracción de empaquetamiento planar son cero. ¡Los planos (010) y (020) no son equivalentes!

Construcción de direcciones y planos Para construir una dirección o un plano en la celda unitaria, simplemente se trabaja hacia atrás. El ejemplo 3-10 muestra cómo podría hacerse esto.

Ejemplo 3-10

Dibuje a) la dirección $[1\bar{2}1]$ y b) el plano $(\bar{2}10)$ en una celda unitaria cúbica.

SOLUCIÓN

- Debido a que se sabe que se necesitará moverse en la dirección y negativa, el origen se localiza en 0, +1, 0. La "cola" de la dirección se ubicará en este nuevo origen. Puede determinarse un segundo punto en la dirección moviéndose +1 en la dirección x, -2 en la dirección y y +1 en la dirección z [figura 3-20a].
- Para dibujar el plano $(\bar{2}10)$, primero tome los recíprocos de los índices para obtener las intersecciones, es decir

$$x = \frac{1}{-2} = -\frac{1}{2}; y = \frac{1}{1} = 1; z = \frac{1}{0} = \infty$$

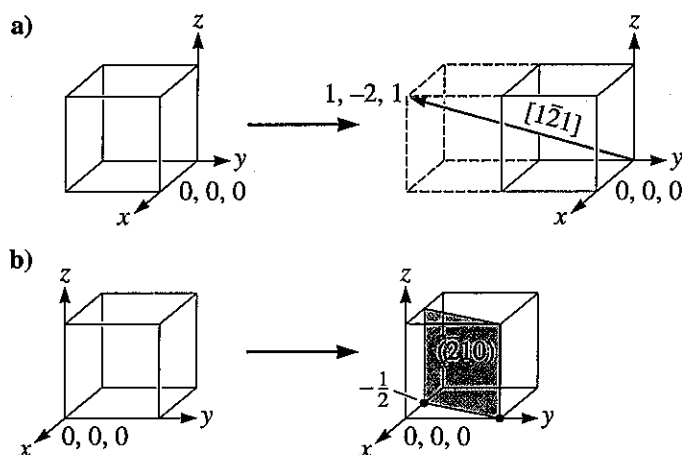


Figura 3-20 Construcción de a) una dirección y b) un plano dentro de una celda unitaria (para el ejemplo 3-10).

Dado que la intersección en x es una dirección negativa y se desea dibujar el plano dentro de la celda unitaria, se mueve el origen $+1$ en la dirección x a $1, 0, 0$.

Después se puede localizar la intersección en x en $-1/2$ y la intersección en y en $+1$. El plano será paralelo al eje z [figura 3-20b)].

Índices de Miller para celdas unitarias hexagonales Se ha diseñado un conjunto especial de índices de Miller-Bravais para las celdas unitarias hexagonales debido a la simetría única del sistema (figura 3-21). El sistema coordenado utiliza cuatro ejes en vez de tres, con el eje a_3 redundante. Los ejes a_1 , a_2 y a_3 se encuentran en un plano que es perpendicular al cuarto eje. El procedimiento para encontrar los índices de los planos es exactamente el mismo que antes, pero se requieren cuatro intersecciones, lo que da índices de la forma $(hkil)$. Debido a la redundancia del eje a_3 y la geometría especial del sistema, los primeros tres enteros en la designación, que corresponden a las intersecciones a_1 , a_2 y a_3 , están relacionados por $h + k = -i$.

Las direcciones en las celdas CH se denotan con el sistema con tres o cuatro ejes. Con el sistema con tres ejes, el procedimiento es el mismo que para los índices de Miller convencionales; en el ejemplo 3-11 se muestran ejemplos de este procedimiento. Un procedimiento más

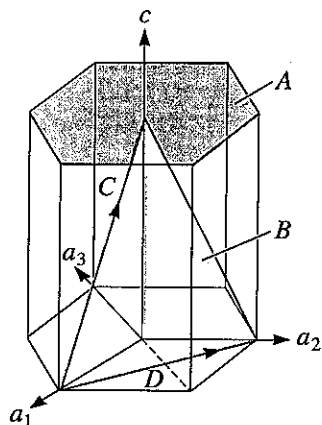


Figura 3-21

Los índices de Miller-Bravais para los planos cristalográficos en las celdas unitarias CH se obtienen utilizando un sistema coordenado con cuatro ejes. Los planos etiquetados A y B y las direcciones etiquetadas C y D son las explicadas en el ejemplo 3-11.

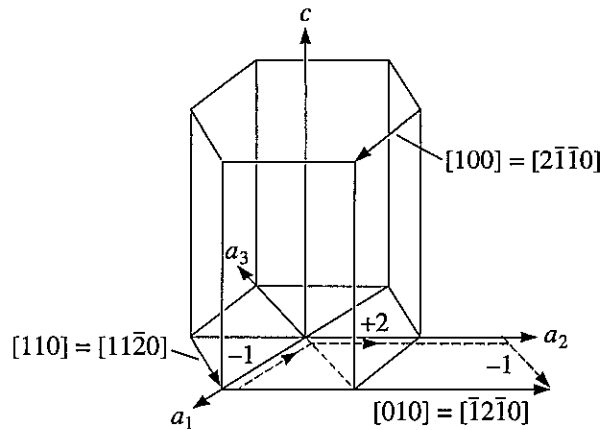


Figura 3-22

Direcciones comunes en la celda unitaria CH, utilizando sistemas con tres y cuatro ejes. Las líneas punteadas muestran que la dirección $[\bar{1}2\bar{1}0]$ es equivalente a la dirección $[010]$.

complicado, por medio del cual la dirección se descompone en cuatro vectores, es necesario para el sistema con cuatro ejes. Se determina el número de parámetros de red que deben moverse en cada dirección para ir de la "cola" a la "cabeza" de la dirección, mientras se sigue asegurando por consistencia que $h + k = -i$. Esto se ilustra en la figura 3-22, que muestra que la dirección $[010]$ es la misma que la dirección $[\bar{1}2\bar{1}0]$.

También se puede convertir la notación con tres ejes a la notación con cuatro ejes para las direcciones por medio de las siguientes relaciones, donde h' , k' y l' son los índices en el sistema con tres ejes:

$$\left. \begin{aligned} h &= \frac{1}{3}(2h' - k') \\ k &= \frac{1}{3}(2k' - h') \\ i &= -\frac{1}{3}(h' + k') \\ l &= l' \end{aligned} \right\} \quad (3-6)$$

Después de la conversión, los valores de h , k , i y l pueden requerir la eliminación de las fracciones o la reducción a los enteros más bajos.

Ejemplo 3-11 *Determinación de los índices de Miller-Bravais para los planos y las direcciones*

Determine los índices de Miller-Bravais para los planos A y B y las direcciones C y D en la figura 3-21.

SOLUCIÓN

Plano A

1. $a_1 = a_2 = a_3 = \infty$, $c = 1$
2. $\frac{1}{a_1} = \frac{1}{a_2} = \frac{1}{a_3} = 0$, $\frac{1}{c} = 1$
3. No hay que eliminar fracciones.
4. (0001)

Plano B

1. $a_1 = 1, a_2 = 1, a_3 = -\frac{1}{2}, c = 1$
2. $\frac{1}{a_1} = 1, \frac{1}{a_2} = 1, \frac{1}{a_3} = -2, \frac{1}{c} = 1$
3. No hay que eliminar fracciones
4. $(11\bar{2}1)$

Dirección C

1. Dos puntos son 0, 0, 1 y 1, 0, 0
2. 0, 0, 1 - 1, 0, 0 = -1, 0, 1
3. No hay que eliminar fracciones o reducir enteros
4. $[\bar{1}01]$ o $[\bar{2}113]$

Dirección D

1. Dos puntos son 0, 1, 0 y 1, 0, 0
2. 0, 1, 0 - 1, 0, 0 = -1, 1, 0
3. No hay que eliminar fracciones o reducir enteros
4. $[\bar{1}10]$ o $[\bar{1}100]$

Planos y direcciones compactos Al examinar la relación entre el radio atómico y el parámetro de red se buscan las direcciones compactas, donde los átomos están en contacto continuo. Ahora se pueden asignar índices de Miller a estas direcciones compactas, como se muestra en la tabla 3-5.

También se pueden examinar más de cerca las celdas unitarias CCCa y CH y descubrir que hay al menos un conjunto de planos compactos en cada una. En la figura 3-23 se muestran los planos compactos. Observe que se produce en dos dimensiones un arreglo hexagonal de átomos. Los planos compactos son fáciles de encontrar en la celda unitaria CH; son los planos (0001) y (0002) de la estructura CH y se les da el nombre especial de **planos basales**. De hecho, se puede construir una celda unitaria CH apilando planos compactos en una **secuencia de apilamiento** . . . ABABAB . . . (figura 3-23). Los átomos en el plano B, el plano (0002), se ajustan en los valles entre los átomos en el plano A, el plano inferior (0001). Si se coloca otro plano idéntico en la orientación al plano A en los valles del plano B directamente sobre el plano A, se crea la estructura CH. Observe que todos los planos compactos posibles son paralelos entre sí. Sólo los planos basales, (0001) y (0002), son compactos.

TABLA 3-5 ■ Planos y direcciones compactos

Estructura	Direcciones	Planos
CS	$\langle 100 \rangle$	Ninguno
CCCu	$\langle 111 \rangle$	Ninguno
CCCa	$\langle 110 \rangle$	$\{111\}$
CH	$\langle 100 \rangle, \langle 110 \rangle$ o $\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$\{0001\}, \{0002\}$

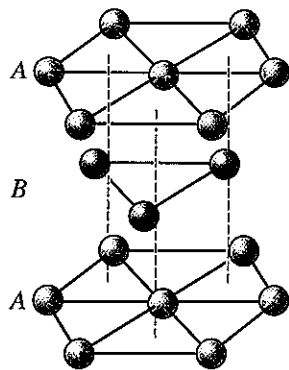


Figura 3-23
La secuencia de apilamiento *ABABAB* de los planos compactos produce la estructura CH.

A partir de la figura 3-23, se encuentra el número de coordinación de los átomos en la estructura CH. El átomo central en un plano basal toca otros seis átomos en el mismo plano. Tres átomos en el plano inferior y tres átomos en un plano superior también tocan el mismo átomo. El número de coordinación es 12.

En la estructura CCCa, los planos compactos son de la forma $\{111\}$ (figura 3-24). Cuando se apilan planos (111) paralelos, los átomos en el plano *B* se ajustan sobre los valles en el plano *A* y los átomos en el plano *C* se ajustan sobre los valles en los planos *A* y *B*. El cuarto plano se ajusta directamente sobre los átomos en el plano *A*. En consecuencia, se produce una secuencia de apilamiento $\dots ABCABCABC \dots$ utilizando el plano (111). De nuevo, se encuentra que cada átomo tiene un número de coordinación igual a 12.

A diferencia de la celda unitaria CH, hay cuatro conjuntos de planos compactos no paralelos —(111), $(11\bar{1})$, $(\bar{1}11)$ y $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ — en la celda unitaria CCCa. Esta diferencia entre las celdas unitarias CCCa y CH —la presencia o ausencia de planos compactos intersecantes— afecta el comportamientos de los metales con estas estructuras.

Comportamiento isotrópico y anisotrópico Debido a las diferencias en el arreglo atómico en los planos y direcciones dentro de un cristal, algunas propiedades también varían con la dirección. Un material es **cristalográficamente anisotrópico** si sus propiedades dependen de la dirección cristalográfica a lo largo de la cual se mide la propiedad. Por ejemplo, el módulo de elasticidad del aluminio es de 75.9 GPa (11×10^6 psi) en las direcciones $\langle 111 \rangle$, pero de sólo 63.4 GPa (9.2×10^6 psi) en las direcciones $\langle 100 \rangle$. Si las

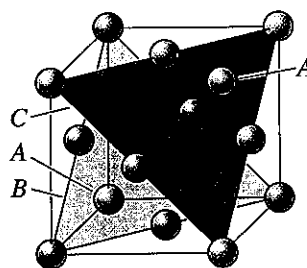
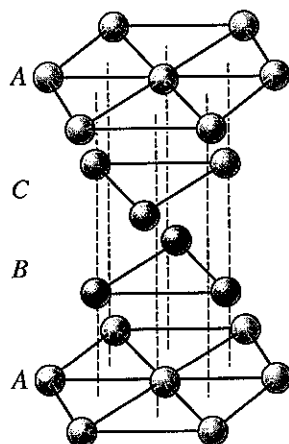


Figura 3-24
La secuencia de apilamiento *ABCABCABC* de los planos compactos produce la estructura CCCa.

propiedades son idénticas en todas las direcciones, el material es cristalográficamente **isotrópico**. Observe que un material como el aluminio, el cual es cristalográficamente anisotrópico, puede comportarse como un material isotrópico si está en una forma policristalina. Esto se debe a que las orientaciones al azar de los distintos cristales en un material policristalino cancelarán en su mayoría cualquier efecto de la anisotropía como resultado de la estructura cristalina. En general, la mayoría de los materiales policristalinos exhibirán propiedades isotrópicas. Los materiales que son monocristalinos o en los cuales varios granos están orientados a lo largo de ciertas direcciones (obtenidas de manera natural o deliberada por medio del procesamiento) por lo general tendrán propiedades mecánicas, ópticas, magnéticas y dieléctricas anisotrópicas.

Espaciado interplanar A la distancia entre dos planos paralelos adyacentes de átomos con los mismos índices de Miller se le llama **espaciado interplanar** (d_{hkl}). El espaciado interplanar en materiales *cúbicos* está dado por la ecuación general

$$d_{hkl} = \frac{a_0}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}, \quad (3-7)$$

donde a_0 es el parámetro de red y h , k y l representan los índices de Miller de los planos adyacentes que se están considerando. Los espaciados interplanares para los materiales no cúbicos están dados por expresiones más complejas.

3-6 Sitios intersticiales

En todas las estructuras cristalinas, existen pequeños orificios entre los átomos usuales en los que pueden colocarse átomos más pequeños. A estas localizaciones se les llama **sitios intersticiales**.

Un átomo, cuando se coloca dentro de un sitio intersticial, toca dos o más átomos en la red. Este átomo intersticial tiene un número de coordinación igual al número de átomos que toca. La figura 3-25 muestra las localizaciones intersticiales en las estructuras CS, CCCu y CCCa. El **sitio cúbico**, con un número de coordinación de ocho, ocurre en la estructura CS en la posición centrada en el cuerpo. Los **sitios octaédricos** dan un número de coordinación de seis (no ocho). Se les conoce como sitios octaédricos porque los átomos que tienen contacto con el átomo intersticial forman un octaedro. Los **sitios tetraédricos** dan un número de coordinación de cuatro. Como ejemplo, los sitios octaédricos en las celdas unitarias CCCu se localizan en las caras del cubo; un átomo pequeño colocado en el sitio octaédrico toca los cuatro átomos en las esquinas de la cara, el átomo en el centro de la celda unitaria, más otro átomo en el centro de la celda unitaria adyacente, lo que da un número de coordinación de seis. En las celdas unitarias CCCa, los sitios octaédricos ocurren en el centro de cada arista del cubo, al igual que en el centro del cuerpo de la celda unitaria.

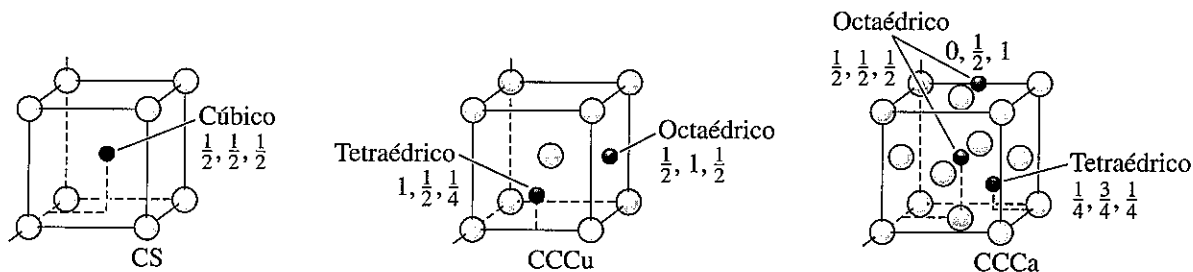


Figura 3-25 Localización de los sitios intersticiales en las celdas unitarias cúbicas. Sólo se muestran los sitios representativos.

Ejemplo 3-12 *Cálculo de los sitios octaédricos*

Calcule el número de sitios octaédricos que pertenecen de *manera única* a una celda unitaria CCCa.

SOLUCIÓN

Los sitios octaédricos incluyen las 12 aristas de la celda unitaria, con las coordenadas

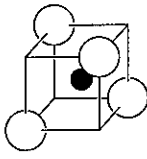
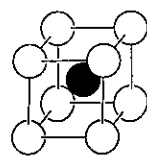
$$\begin{array}{cccc} \frac{1}{2}, 0, 0 & \frac{1}{2}, 1, 0 & \frac{1}{2}, 0, 1 & \frac{1}{2}, 1, 1 \\ 0, \frac{1}{2}, 0 & 1, \frac{1}{2}, 0 & 1, \frac{1}{2}, 1 & 0, \frac{1}{2}, 1 \\ 0, 0, \frac{1}{2} & 1, 0, \frac{1}{2} & 1, 1, \frac{1}{2} & 0, 1, \frac{1}{2} \end{array}$$

más la posición central $1/2, 1/2, 1/2$. Cada uno de los sitios en la arista de la celda unitaria está compartido entre cuatro celdas unitarias, por lo que sólo $1/4$ de cada sitio pertenece de manera única a cada celda unitaria. Por tanto, el número de sitios que pertenecen de manera única a cada celda es

$$\frac{12 \text{ aristas}}{\text{celda}} \cdot \frac{\frac{1}{4} \text{ sitio}}{\text{arista}} + \frac{1 \text{ centrado en el cuerpo}}{\text{celda}} \cdot \frac{1 \text{ sitio}}{\text{centrada en el cuerpo}} = 4 \text{ sitios octaédricos/celda}$$

Los átomos o iones intersticiales cuyos radios son ligeramente mayores que el radio del sitio intersticial pueden entrar en ese sitio, separando de manera ligera los átomos circundantes. Los átomos cuyos radios son menores que el radio del orificio no se permiten que entren en el sitio intersticial debido a que el ion "traquetearía" alrededor del sitio. Si el átomo intersticial se vuelve muy grande, prefiere entrar a un sitio que tenga un número de coordinación

TABLA 3-6 ■ Número de coordinación y razón de los radios

Número de coordinación	Localización del intersticial	Razón de los radios	Representación
2	Lineal	0-0.155	
3	Centro del triángulo	0.155-0.225	
4	Centro del tetraedro	0.225-0.414	
6	Centro del octaedro	0.414-0.732	
8	Centro del cubo	0.732-1.000	

mayor (tabla 3-6). Por tanto, un átomo con una razón de radios entre 0.225 y 0.414 entra a un sitio tetraédrico; si su radio es un poco mayor que 0.414, entra en un sitio octaédrico.

Muchos cristales iónicos (véase la sección 3-7) pueden verse como si estuvieran generados por el empaquetamiento compacto de aniones grandes. Entonces los cationes pueden verse como iones más pequeños que se ajustan en los sitios intersticiales de los aniones compactos. Por tanto, la razón de los radios descrita en la tabla 3-6 también se aplica a las razones de los radios del catión al del anión. El empaquetamiento en cristales iónicos no es tan ajustado como en los metales CCCa o CH.

3-7 Estructuras cristalinas de los materiales iónicos

Los materiales iónicos deben tener estructuras cristalinas que aseguren la neutralidad eléctrica, pero que permitan que los iones de distintos tamaños se empaquen de manera eficiente. Como se mencionó anteriormente, las estructuras cristalinas iónicas pueden verse como estructuras compactas de aniones. Los aniones forman tetraedros u octaedros, lo que permite que los cationes entren en sus sitios intersticiales apropiados. En algunos casos, puede ser más sencillo visualizar el poliedro de coordinación de los cationes con los aniones pasando a los sitios intersticiales. Recuerde del capítulo 2 que con mucha frecuencia en los materiales reales con aplicaciones en la ingeniería, el enlace nunca es 100% iónico. Sin embargo, se sigue utilizando esta descripción de la estructura cristalina para explicar la estructura cristalina de los materiales cerámicos. Se deben considerar los siguientes factores para comprender las estructuras cristalinas de los sólidos enlazados de manera iónica.

Radios iónicos Las estructuras cristalinas de los compuestos enlazados de manera iónica con frecuencia pueden describirse colocando los aniones en los puntos de red normales de una celda unitaria, con los cationes localizados en uno o más de los sitios intersticiales descritos en la sección 3-6 (o viceversa). La razón de los tamaños de los radios iónicos de los aniones y cationes influye en la manera del empaquetamiento y en el número de coordinación (tabla 3-6). Observe que los radios de los átomos y iones son distintos. Por ejemplo, el radio de un átomo de oxígeno es de 0.6 Å; sin embargo, el radio de un anión oxígeno (O^{2-}) es de 1.32 Å. Esto se debe a que un anión oxígeno ha adquirido dos electrones adicionales y se ha vuelto más grande. Como regla general, los aniones son mayores que los cationes. Se espera que los cationes, al haber adquirido una carga positiva con la pérdida de electrones, sean más pequeños. Estrictamente hablando, los radios de los cationes y aniones también dependen del número de coordinación. Por ejemplo, el radio de un ion Al^{+3} es de 0.39 Å cuando el número de coordinación es de cuatro (coordinación tetraédrica); sin embargo el radio del ion Al^{+3} es de 0.53 Å cuando el número de coordinación es de 6 (coordinación octaédrica). También, observe que el número de coordinación para los cationes es el número de aniones más cercanos y viceversa. El radio de un átomo también depende del número de coordinación. Por ejemplo, ¿el radio de un átomo de hierro en los polimorfos CCCa y CCCu es diferente! Esto indica que los átomos y iones no son “esferas duras” con radios atómicos fijos. El apéndice B en este libro contiene los radios atómicos y iónicos para los distintos elementos.

Neutralidad eléctrica El material en general tiene que ser eléctricamente neutro. Si las cargas en el anión y el catión son idénticas y el número de coordinación para cada ion es idéntico para asegurar un balance apropiado de la carga, entonces el compuesto tendrá una fórmula AX (A : catión, X : anión). Como ejemplo, cada catión puede estar rodeado por seis aniones, mientras que cada anión está, a su vez, rodeado por seis cationes. Si la valencia del catión es de +2 y la del anión es de -1, entonces debe estar presente el doble de aniones y la fórmula es AX_2 . La estructura del compuesto AX_2 debe asegurar que el número de coordinación del catión sea el doble del número de coordinación del anión. Por ejemplo, cada catión puede tener ocho aniones vecinos más cercanos, con sólo cuatro cationes tocando cada anión.

Conexión entre los poliedros de los aniones Como regla, los poliedros de coordinación (formados por medio del empaquetamiento compacto de los aniones) compartirán esquinas opuestas a las caras o a las aristas. Esto se debe a que en los poliedros que comparten esquinas, la repulsión electrostática entre los cationes se reduce de manera considerable, lo que conduce a la formación de una estructura cristalina más estable. En las siguientes explicaciones se describen varias estructuras comunes en los materiales cerámicos. En comparación con los metales, las estructuras cerámicas son más complejas. Las constantes de red de los materiales cerámicos tienden a ser mayores que las de los materiales metálicos debido a que la repulsión electrostática entre los iones previene el empaquetamiento compacto de los aniones y cationes.

Ejemplo 3-13 *Razón de los radios para el KCl*

Para el cloruro de potasio (KCl), a) verifique que el compuesto tiene la estructura del cloruro de cesio y b) calcule el factor de empaquetamiento para el compuesto.

SOLUCIÓN

a. Con base en el apéndice B, $r_{K^+} = 0.133$ nm y $r_{Cl^-} = 0.181$ nm, por lo que

$$\frac{r_{K^+}}{r_{Cl^-}} = \frac{0.133}{0.181} = 0.735$$

Dado que $0.732 < 0.735 < 1.000$, el número de coordinación para cada tipo de ion es de ocho y es probable la estructura del CsCl.

b. Los iones se tocan a lo largo de la diagonal del cuerpo de la celda unitaria, por lo que

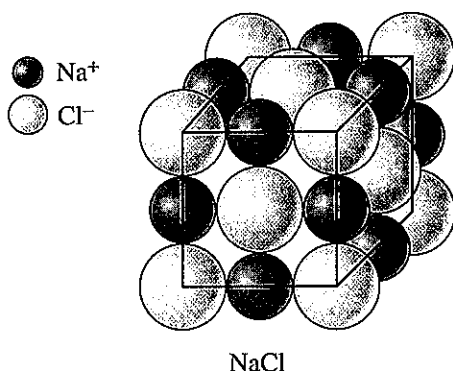
$$\sqrt{3}a_0 = 2r_{K^+} + 2r_{Cl^-} = 2(0.133) + 2(0.181) = 0.628 \text{ nm}$$

$$a_0 = 0.363 \text{ nm}$$

$$\begin{aligned} \text{Factor de empaquetamiento} &= \frac{\frac{4}{3}\pi r_{K^+}^3 (1 \text{ ion K}) + \frac{4}{3}\pi r_{Cl^-}^3 (1 \text{ ion Cl})}{a_0^3} \\ &= \frac{\frac{4}{3}\pi (0.133)^3 + \frac{4}{3}\pi (0.181)^3}{(0.363)^3} = 0.73 \end{aligned}$$

En la figura 3-10 se muestra esta estructura.

Estructura del cloruro de sodio La razón de los radios para los iones sodio y cloruro es $r_{Na^+}/r_{Cl^-} = 0.097 \text{ nm}/0.181 \text{ nm} = 0.536$; el ion sodio tiene una carga de $+1$; el ion cloruro tiene una carga de -1 . Por tanto, con base en el balance de las cargas y la razón de los radios, cada anión y catión debe tener un número de coordinación de seis. La estructura CCCa, con los iones Cl^{-1} en las posiciones CCCa y los Na^{+1} en los cuatro sitios octaédricos, cumple estos requerimientos (figura 3-26). También puede considerarse que esta estructura sea CCCa con dos iones, un Na^{+1} y un Cl^{-1} , asociados con cada punto de red. Muchas cerámicas, incluyendo el óxido de magnesio (MgO), el óxido de calcio (CaO) y el óxido de hierro (FeO) tienen esta estructura.

**Figura 3-26**

Estructura del cloruro de sodio, una celda unitaria CCCa con dos iones (Na^+ y Cl^-) por punto de red. *Nota:* El tamaño de los iones no está a escala.

Ejemplo 3-14

Ilustración de una ecuación de estado y la deducción de la densidad

Demuestre que el MgO tiene la estructura cristalina del cloruro de sodio y calcule la densidad del MgO .

SOLUCIÓN

Con base en el apéndice B, $r_{\text{Mg}^{+2}} = 0.066 \text{ nm}$ y $r_{\text{O}^{-2}} = 0.132 \text{ nm}$, por lo que

$$\frac{r_{\text{Mg}^{+2}}}{r_{\text{O}^{-2}}} = \frac{0.066}{0.132} = 0.50$$

Dado que $0.414 < 0.50 < 0.732$, el número de coordinación para cada ion es de seis y es posible la estructura del cloruro de sodio.

Las masas atómicas son de 24.312 y 16.00 g/mol para el magnesio y el oxígeno, respectivamente. Los iones se tocan a lo largo de la arista del cubo, por lo que

$$a_0 = 2r_{\text{Mg}^{+2}} + 2r_{\text{O}^{-2}} = 2(0.066) + 2(0.132) = 0.396 \text{ nm} = 3.96 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

$$\rho = \frac{(4 \text{ Mg}^{+2})(24.312) + (4 \text{ O}^{-2})(16.00)}{(3.96 \times 10^{-8} \text{ cm})^3 (6.022 \times 10^{23})} = 4.31 \text{ g/cm}^3$$

Estructura de la blenda de zinc

La blenda de zinc es el nombre de la estructura cristalina adoptada por el ZnS . Aunque los iones Zn tienen una carga de +2 y los iones S tienen una carga de -2, la blenda de zinc (ZnS) no puede tener la estructura del cloruro de sodio debido a que

$$\frac{r_{\text{Zn}^{+2}}}{r_{\text{S}^{-2}}} = 0.074 \text{ nm} / 0.184 \text{ nm} = 0.402$$

Esta razón de los radios demanda un número de coordinación de cuatro, lo cual a su vez significa que los iones zinc entran a los sitios tetraédricos en una celda unitaria (figura 3-27). La estructura CCCa, con los aniones sulfuro en los puntos de red normales y los cationes Zn a la mitad de los sitios tetraédricos, puede cumplir las restricciones del balance de las cargas y del número de coordinación. Esta estructura la tiene una variedad de materiales, incluyendo el semiconductor GaAs y muchos otros semiconductores III-V (capítulo 2).

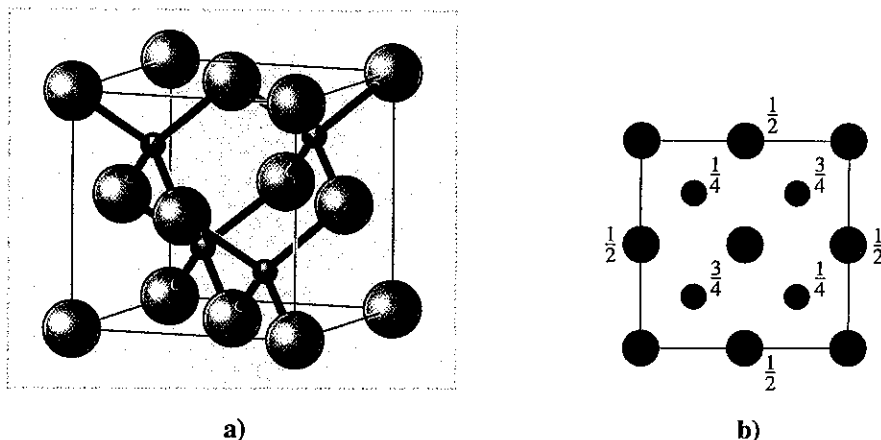


Figura 3-27 a) Celda unitaria de la blenda de zinc, b) vista en planta. Las fracciones indican las posiciones de los átomos fuera de la página con relación a la altura de una celda unitaria.

Ejemplo 3-15

Cálculo de la densidad teórica del GaAs

La constante de red del arseniuro de galio (GaAs) es de 5.65 Å. Demuestre que la densidad teórica del GaAs es de 5.33 g/cm³.

SOLUCIÓN

Para la celda unitaria de “blenda de zinc” del GaAs, se tienen cuatro átomos de Ga y cuatro de As por celda unitaria.

A partir de la tabla periódica (capítulo 2):

Cada mol (6.022×10^{23} átomos) de Ga tiene una masa de 69.72 g. Por tanto, la masa de cuatro átomos de Ga será 4×69.72 (6.022×10^{23}) g.

Cada mol (6.022×10^{23} átomos) de As tiene una masa de 74.91 g. Por tanto, la masa de cuatro átomos de As será 4×74.91 (6.022×10^{23}) g.

Estos átomos ocupan un volumen de $(5.65 \times 10^{-8})^3$ cm³.

$$\text{densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} = \frac{4(69.72 + 74.91)/(6.022 \times 10^{23})}{(5.65 \times 10^{-8})^3} = 5.33 \text{ g/cm}^3$$

Por tanto, la densidad teórica del GaAs es de 5.33 g/cm³.

Estructura de la fluorita La estructura de la fluorita es CCCa, con los aniones localizados en las ocho posiciones tetraédricas (figura 3.28). Por tanto, hay cuatro cationes y ocho aniones por celda y el compuesto cerámico debe tener la fórmula AX_2 , como en la fluorita de calcio o CaF_2 . En la designación AX_2 , A es el catión y X es el anión. El número de coordinación de los iones calcio es ocho, pero el de los iones fluoruro es cuatro, por tanto se asegura un balance de las cargas. Uno de los polimorfos de la ZrO_2 conocido como zirconia cúbica exhibe esta estructura cristalina. Otros compuestos que exhiben esta estructura incluyen al UO_2 , el ThO_2 y el CeO_2 .

Estructura del corindón Ésta es una de las estructuras cristalinas de la alúmina conocida como alúmina alfa ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$). En la alúmina, los aniones oxígeno se empaquetan en un arreglo hexagonal y los cationes aluminio ocupan alguna de las posiciones octaé-

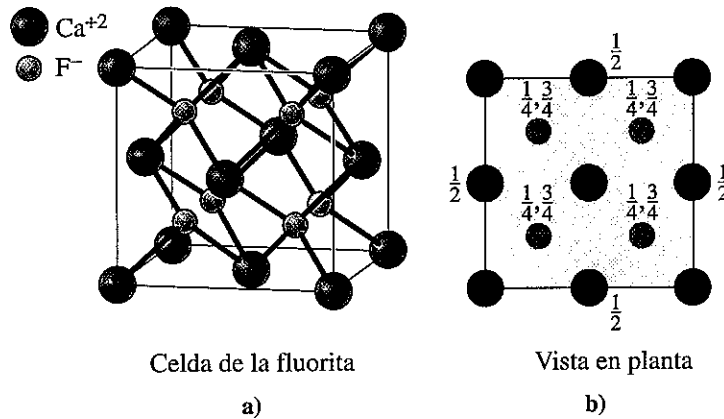


Figura 3-28 a) Celda unitaria de la fluorita. b) Vista en planta. Las fracciones indican las posiciones de los átomos fuera de la página con relación a la altura de la celda unitaria.

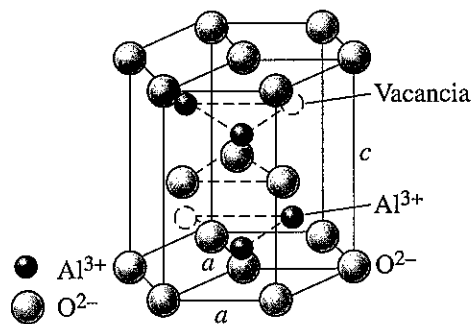


Figura 3-29

Estructura del corindón de la alúmina alfa ($\alpha-Al_2O_3$).

dricas disponibles (figura 3-29). La alúmina probablemente es el material cerámico más utilizado. Las aplicaciones incluyen, pero no se limitan a bujías, refractarios, sustratos de empaquetamiento electrónico y abrasivos.

Ejemplo 3-16 Estructura cristalina de la perovskita

La perovskita es un mineral que contiene calcio, titanio y oxígeno. La celda unitaria es cúbica y tiene un átomo de calcio en cada esquina, un átomo de oxígeno centrado en cada cara y un átomo de titanio en la posición centrada en el cuerpo. Los átomos contribuyen a la celda unitaria de la manera usual (una contribución de $1/8$ de átomo por cada átomo en las esquinas, etcétera).

- a) Describa esta estructura como una red y una base. b) ¿Cuántos átomos de cada tipo hay por celda unitaria? c) Una manera alterna de dibujar la celda unitaria para la perovskita tiene el calcio en la posición centrada en el cuerpo de cada celda unitaria cúbica. ¿Cuáles son las posiciones de los átomos de titanio y oxígeno en esta representación de la celda unitaria? d) Contando el número de átomos de cada tipo por celda unitaria, demuestre que la fórmula para la perovskita es la misma para ambas representaciones de la celda unitaria.

SOLUCIÓN

- a) La red debe pertenecer al sistema cristalino cúbico. Dado que se localizan distintos tipos de átomos en las esquinas, centrados en la cara y centrados en el cuerpo, la red debe ser cúbica sencilla. La estructura puede describirse como una red cúbica sencilla

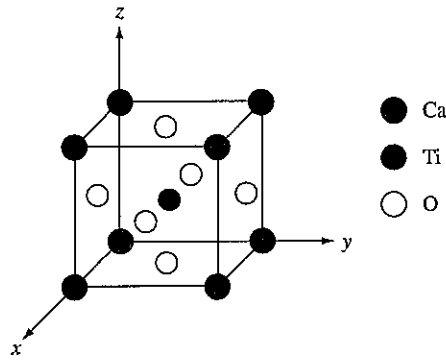


Figura 3-30
Celda unitaria de la perovskita.

con una base de Ca (0, 0, 0), Ti (1/2, 1/2, 1/2) y O (0, 1/2, 1/2), (1/2, 0, 1/2) y (1/2, 1/2, 0). En la figura 3-30 se muestra la celda unitaria.

- b) Existen dos métodos para calcular el número de átomos por celda unitaria. Utilizando el concepto de red y base,

$$\frac{1 \text{ punto de red}}{\text{celda unitaria}} * \frac{5 \text{ átomos}}{\text{punto de red}} = \frac{5 \text{ átomos}}{\text{celda unitaria}}$$

Utilizando el concepto de celda unitaria,

$$\begin{aligned} & \frac{8 \text{ esquinas}}{\text{celda unitaria}} * \frac{1/8 \text{ de átomo de Ca}}{\text{esquina}} + \frac{1 \text{ centrado en el cuerpo}}{\text{celda unitaria}} * \frac{1 \text{ átomo de Ti}}{\text{centrado en el cuerpo}} \\ & + \frac{6 \text{ centrados en la cara}}{\text{celda unitaria}} * \frac{1/2 \text{ de átomo de O}}{\text{centrado en la cara}} = \frac{5 \text{ átomos}}{\text{celda unitaria}} \end{aligned}$$

Como se esperaba, el número de átomos por celda unitaria es el mismo sin importar cuál método se utilice. La fórmula química para la perovskita es CaTiO_3 (titanato de calcio). Se dice que los compuestos con la fórmula general ABO_3 y esta estructura tienen la estructura cristalina de la perovskita. Uno de los polimorfos del titanato de bario, el cual se utiliza para la fabricación de capacitores para aplicaciones electrónicas, y una forma del zirconato de plomo exhiben esta estructura.

- c) Si el calcio se ubica en la posición centrada en el cuerpo en vez de en las esquinas de la celda unitaria, entonces el titanio debe localizarse en las esquinas de la celda unitaria y los átomos de oxígeno deben ubicarse en los centros de las aristas de la celda unitaria, como se muestra en la figura 3-31. Observe que esto es equivalente al desplazamiento de cada átomo en la base dada en el inciso a) por el vector $[1/2 \ 1/2 \ 1/2]$.

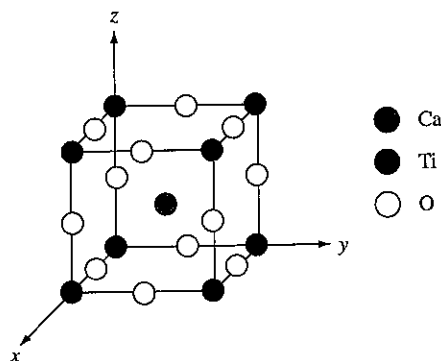


Figura 3-31
Representación alterna de la celda unitaria de la perovskita.

El átomo de Ca se desplaza de (0, 0, 0) a (1/2, 1/2, 1/2) y el átomo de Ti se desplaza de (1/2, 1/2, 1/2) a (1, 1, 1), la cual es equivalente al origen de la celda unitaria adyacente o (0, 0, 0). Observe que no se ha cambiado el cristal; sólo son diferentes las coordenadas de los átomos en la base. Otra descripción de red y base de la perovskita es por tanto una red cúbica sencilla con una base de Ca (1/2, 1/2, 1/2), Ti (0, 0, 0) y O (1/2, 0, 0), (0, 1/2, 0) y (0, 0, 1/2).

Utilizando el concepto de red y base para contar el número de átomos por celda unitaria,

$$\frac{1 \text{ punto de red}}{\text{celda unitaria}} * \frac{5 \text{ átomos}}{\text{punto de red}} = \frac{5 \text{ átomos}}{\text{celda unitaria}}$$

Utilizando el concepto de celda unitaria,

$$\begin{aligned} & \frac{1 \text{ centrado en el cuerpo}}{\text{celda unitaria}} * \frac{1 \text{ átomo de Ca}}{\text{centrado en el cuerpo}} + \frac{8 \text{ esquinas}}{\text{celda unitaria}} * \frac{1/8 \text{ de átomo de Ti}}{\text{esquina}} \\ & + \frac{12 \text{ centrados en las aristas}}{\text{celda unitaria}} * \frac{1/4 \text{ de átomo de O}}{\text{centrado en la arista}} = \frac{5 \text{ átomos}}{\text{celda unitaria}} \end{aligned}$$

De nuevo se encuentra que la fórmula química es CaTiO_3 .

3-8 Estructuras covalentes

Los materiales enlazados de manera covalente con frecuencia tienen estructuras complejas para poder cumplir con las restricciones direccionales impuestas por el enlace.

Estructura cúbica del diamante Los elementos tales como el silicio, el germanio (Ge), el α -Sn y el carbono (en su forma de diamante) están enlazados por medio de cuatro enlaces covalentes y producen un **tetraedro** [figura 3-32a)]. El número de coordinación para cada átomo de silicio es de sólo cuatro, debido a la naturaleza del enlace covalente.

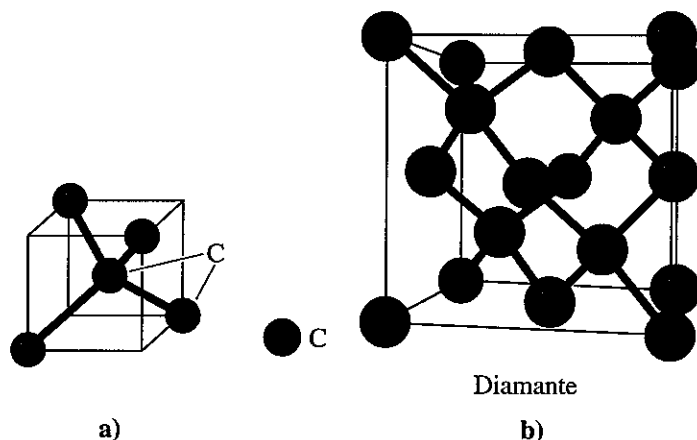


Figura 3-32 Celda unitaria a) tetraédrica y b) cubica del diamante (CD). Esta estructura abierta se produce debido a los requerimientos del enlace covalente.

Al combinar estos grupos tetraédricos, puede construirse un cubo grande [figura 3-32b)]. Este cubo grande contiene ocho cubos más pequeños que son del tamaño del cubo tetraédrico; sin embargo sólo cuatro de los cubos contienen tetraedros. El cubo grande es la celda unitaria **cúbica del diamante** (CD). Los átomos en las esquinas de los cubos tetraédricos proveen los átomos en los puntos de red CCCa regulares. Están presentes cuatro átomos adicionales dentro de la celda unitaria CD resultantes de los átomos en el centro de los cubos tetraédricos. La estructura cristalina CD se puede describir como una red CCCa con dos átomos asociados con cada punto de red (o una base de 2). Por tanto, hay ocho átomos por celda unitaria.

Ejemplo 3-17

Determinación del factor de empaquetamiento para la estructura cúbica del diamante

Describa la estructura cúbica del diamante como una red y una base y determine su factor de empaquetamiento.

SOLUCIÓN

La estructura cúbica del diamante es una red cúbica centrada en la cara con una base de dos átomos del mismo tipo ubicados en $(0, 0, 0)$ y $(1/4, 1/4, 1/4)$. El átomo de la base localizado en $(0,0,0)$ justifica los átomos ubicados en los puntos de red CCCa, los cuales son $(0, 0, 0)$, $(0, 1/2, 1/2)$, $(1/2, 0, 1/2)$ y $(1/2, 1/2, 0)$ en términos de las coordenadas de la celda unitaria. Adicionando el vector $[1/4, 1/4, 1/4]$ a cada uno de estos puntos, las cuatro coordenadas atómicas adicionales en el interior de la celda unitaria se determinan como $(1/4, 1/4, 1/4)$, $(1/4, 3/4, 3/4)$, $(3/4, 1/4, 3/4)$ y $(3/4, 3/4, 1/4)$. Hay ocho átomos por celda unitaria en la estructura cúbica del diamante:

$$\frac{4 \text{ puntos de red}}{\text{celda unitaria}} * \frac{2 \text{ átomos}}{\text{punto de red}} = \frac{8 \text{ átomos}}{\text{celda unitaria}}$$

Los átomos localizados en las posiciones del tipo $(1/4, 1/4, 1/4)$ se encuentran en los centros de los tetraedros formados por los átomos ubicados en los puntos de red CCCa. Los átomos en las posiciones del tipo $(1/4, 1/4, 1/4)$ están en contacto directo con los cuatro átomos circundantes. Considere la distancia entre el centro del átomo localizado en $(0, 0, 0)$ y el centro del átomo ubicado en $(1/4, 1/4, 1/4)$. Esta distancia es igual a un cuarto de la diagonal del cuerpo o a dos radios atómicos, como se muestra en la figura 3-33. Por tanto,

$$\frac{a_0 \sqrt{3}}{4} = 2r$$

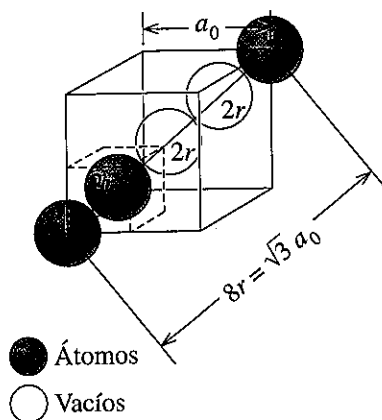


Figura 3-33

Determinación de la relación entre el parámetro de red y el radio atómico en una celda cúbica del diamante (para el ejemplo 3-17).

o

$$a_0 = \frac{8r}{\sqrt{3}}$$

El factor de empaquetamiento es la razón del volumen del espacio ocupado por los átomos en la celda unitaria al volumen de la celda unitaria:

$$\text{Factor de empaquetamiento} = \frac{8 \text{ átomos/celda} \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right)}{a_0^3}$$

$$\text{Factor de empaquetamiento} = \frac{8 \text{ átomos/celda} \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right)}{(8r/\sqrt{3})^3}$$

$$\text{Factor de empaquetamiento} = 0.34$$

Ésta es una estructura relativamente abierta en comparación con las estructuras empaquetadas de manera compacta. En el capítulo 5 aprenderá que la apertura de una estructura es uno de los factores que afecta la velocidad a la que se difunden los distintos átomos en un material dado.

Ejemplo 3-18

La constante de red del Si es de 5.43 Å. Calcule el radio del átomo de silicio y la densidad teórica del silicio. La masa atómica del Si es de 28.09 g/mol.

SOLUCIÓN

El silicio tiene la estructura cúbica del diamante. Como se muestra en el ejemplo 3-17 para la estructura cúbica del diamante,

$$r = \frac{a_0 \sqrt{3}}{8}$$

Por tanto, sustituyendo $a_0 = 5.43$ Å, el radio del átomo de silicio = 1.176 Å. Éste es el mismo radio listado en el apéndice B. Para la densidad se utiliza el mismo método que en el ejemplo 3-15. Reconociendo que hay ocho átomos de Si por celda unitaria, entonces

$$\text{densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} = \frac{8(28.09)/(6.022 \times 10^{23})}{(5.43 \times 10^{-8} \text{ cm})^3} = 2.33 \text{ g/cm}^3$$

Éste es el mismo valor de la densidad listado en el apéndice A.

Sílice cristalina

En varias de sus formas, la sílice (o SiO_2) tiene una estructura cerámica cristalina que es parcialmente covalente y parcialmente iónica. La figura 3-34 muestra la estructura cristalina de una de las formas de la sílice, la cristobalita β , la cual es una estructura complicada con una red CCCa. Los radios iónicos del silicio y el oxígeno son 0.042 y 0.132 nm, respectivamente, por lo que la razón de los radios es $r_{\text{Si}^{4+}}/r_{\text{O}^{2-}} = 0.318$ y el número de coordinación es cuatro.

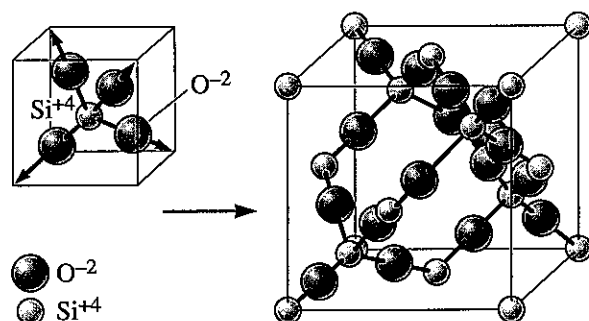


Figura 3-34
El tetraedro silicio-oxígeno y la forma resultante de cristobalita β de la sílice.

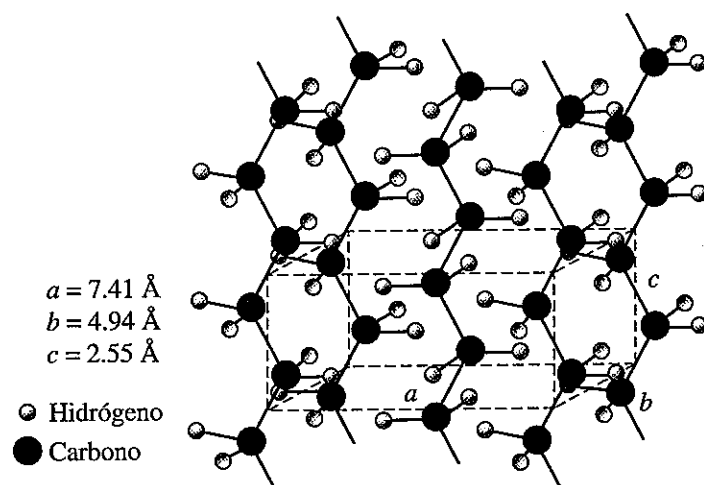


Figura 3-35 Celda unitaria del polietileno cristalino (no está a escala).

Polímeros cristalinos Varios polímeros pueden formar una estructura cristalina. Las líneas punteadas en la figura 3-35 delinean la celda unitaria para la red del polietileno. El polietileno se obtiene uniendo moléculas de C_2H_4 para producir cadenas de polímeros largas que forman una celda unitaria ortorrómbica. Algunos polímeros, incluyendo el nailon, pueden tener varias formas polimórficas. La mayoría de los plásticos de ingeniería son parcialmente amorfos y pueden desarrollar cristalinidad durante su procesamiento. También es posible hacer crecer monocristales de polímeros.

Ejemplo 3-19

¿Cuántos átomos de carbono e hidrógeno hay en cada celda unitaria del polietileno cristalino? En la cadena hay el doble de átomos de hidrógeno que de carbono. La densidad del polietileno es alrededor de 0.9972 g/cm^3 .

SOLUCIÓN

Si x es el número de átomos de carbono, entonces $2x$ es el número de átomos de hidrógeno. A partir de los parámetros de red mostrados en la figura 3-35:

$$\rho = \frac{(x)(12 \text{ g/mol}) + (2x)(1 \text{ g/mol})}{(7.41 \times 10^{-8} \text{ cm})(4.94 \times 10^{-8} \text{ cm})(2.55 \times 10^{-8} \text{ cm})(6.022 \times 10^{23})}$$

$$0.9972 = \frac{14x}{56.2}$$

$$x = 4 \text{ átomos de carbono por celda}$$

$$2x = 8 \text{ átomos de hidrógeno por celda}$$

3-9 Técnicas de difracción para el análisis de estructuras cristalinas

La estructura cristalina de un material cristalino puede analizarse utilizando la **difracción de rayos x (DRX)** o difracción de electrones. Max von Laue (1879-1960) recibió el Premio Nobel en 1914 por su descubrimiento relacionado con la difracción de rayos x por medio de un cristal. William Henry Bragg (1862-1942) y su hijo William Lawrence Bragg (1890-1971) recibieron el Premio Nobel en 1915 por sus contribuciones a la DRX.

Cuando un haz de rayos x que tiene una sola longitud de onda en el mismo orden de magnitud que el espaciado atómico en el material incide sobre ese material, los rayos x se dispersan en todas las direcciones. La mayor parte de la radiación dispersada de un átomo cancela la radiación dispersada de los otros átomos; sin embargo, los rayos x que inciden sobre ciertos planos cristalográficos a ángulos específicos son reforzados en vez de cancelados. A este fenómeno se le llama **difracción**. Los rayos x son difractados, o el haz es reforzado, cuando las condiciones satisfacen la **ley de Bragg**,

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{2d_{hkl}} \quad (3-8)$$

donde el ángulo θ es la mitad del ángulo entre el haz difractado y la dirección del haz original, λ es la longitud de onda de los rayos x y d_{hkl} es el espaciado interplanar entre los planos que ocasionan el reforzamiento constructivo del haz (vea la figura 3-36).

Cuando se preparan materiales en la forma de un polvo fino, siempre hay por lo menos unas cuantas partículas de polvo (cristales o agregados de cristales) cuyos planos (hkl) están orientados al ángulo apropiado θ para cumplir la ley de Bragg. Por tanto, se produce un haz difractado, que forma un ángulo de 2θ con el haz incidente. En un **difractómetro**, un detector de rayos x en movimiento registra los ángulos 2θ a los cuales se difracta el haz, dando un patrón de difracción característico (vea la figura 3-37 en la página 98). Si se conoce la longitud de onda de los rayos x, se pueden determinar los espaciados interplanares y, con el tiempo, la identidad de los planos que ocasionan la difracción. En un instrumento DRX, los rayos x se producen bombardeando un blanco metálico con un haz de electrones de energía alta. Por lo general, los rayos x emitidos por el cobre tienen una longitud de onda $\lambda \approx 1.54060 \text{ \AA}$ (línea $K\alpha_1$) por lo que son los utilizados.

En el método de Laue, el cual fue el primer método de difracción utilizado, el espécimen está en la forma de un monocristal. Se utiliza un haz de "radiación blanca" que consiste en rayos x de distintas longitudes de onda. Cada haz difractado tiene una longitud de onda diferente. En el método de transmisión de Laue, la película fotográfica se coloca detrás del

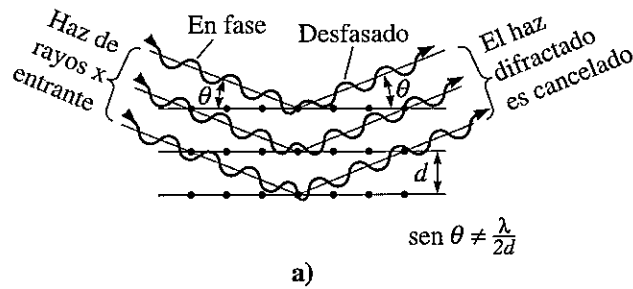
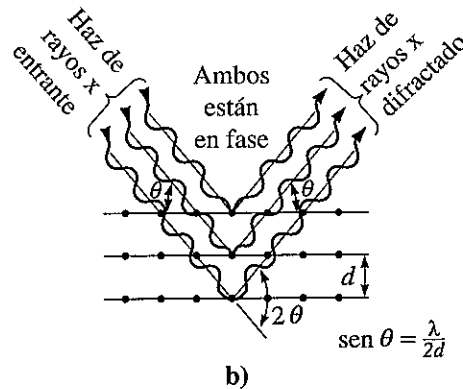


Figura 3-36

Interacciones a) destructiva y b) de refuerzo entre los rayos x y el material cristalino. El reforzamiento se lleva a cabo a ángulos que satisfacen la ley de Bragg.



crystal. En el método de Laue de reflexión inversa, los haces que se difractan de vuelta se registran en una película localizada entre la fuente y la muestra. A partir de los patrones de difracción registrados, pueden determinarse las orientaciones y la calidad del cristal sencillo. También es posible determinar la estructura cristalina utilizando un cristal rotatorio y una fuente de rayos x de longitud de onda fija.

Por lo regular, el análisis de DRX puede conducirse con relativa rapidez (~ 30 minutos a 1 hora por muestra), sobre muestras voluminosas o en polvo sin preparar la muestra de manera extensiva. Esta técnica también puede utilizarse para determinar si el material consiste en muchos granos orientados en una dirección cristalográfica particular (textura) en materiales voluminosos y películas delgadas. Por lo general, un técnico bien entrenado puede conducir el análisis al igual que interpretar la información de la difracción del polvo con bastante facilidad. Como resultado, la DRX se utiliza en varias industrias como una herramienta para propósitos del control de la calidad del producto. El análisis de monocristales y materiales que contienen varias fases puede ser más complicado y requerir más tiempo.

Para identificar la estructura cristalina de un material cúbico, se observa el patrón de las líneas de difracción, por lo regular creando una tabla de los valores de $\text{sen}^2\theta$. Al combinar la ecuación 3-7 con la ecuación 3-8 para el espaciado interplanar, se encuentra que:

$$\text{sen}^2\theta = \frac{\lambda^2}{4a_0^2} (h^2 + k^2 + l^2)$$

En los metales cúbicos sencillos se difractarán todos los planos posibles, lo que da un patrón $h^2 + k^2 + l^2$ de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, ... En los metales cúbicos centrados en el cuerpo, la difracción sólo se lleva a cabo a partir de los planos que tienen una suma $h^2 + k^2 + l^2$ de 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, ... Para los metales cúbicos centrados en la cara, ocurre la interferencia más destructiva y se difractarán los planos que tienen sumas $h^2 + k^2 + l^2$ de 3, 4, 8, 11, 12, 16, ... Al calcular los valores de $\text{sen}^2\theta$ y después encontrar el patrón apropiado, se puede determinar la estructura cristalina para los metales que tienen una de estas estructuras sencillas, como se ilustra en el ejemplo 3-20.

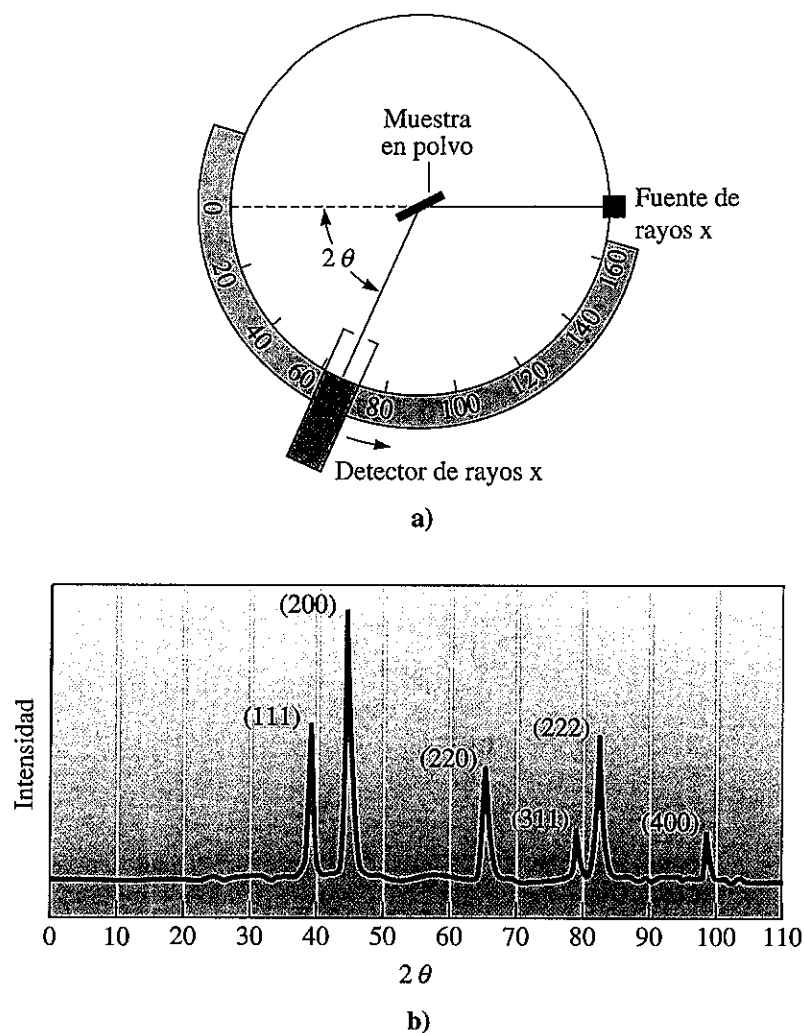


Figura 3-37 a) Diagrama de un difractómetro, que presenta la muestra en polvo y los haces incidentes y difractados. b) Patrón de difracción obtenido a partir de una muestra de polvo de oro.

Ejemplo 3-20

Análisis de la información de la difracción de rayos x

Los resultados de un experimento de difracción de rayos x utilizando rayos x con $\lambda = 0.7107 \text{ \AA}$ (radiación obtenida a partir de un blanco de molibdeno (Mo)) muestra que los picos de la difracción ocurren en los siguientes ángulos 2θ :

Pico	$2\theta (^{\circ})$	Pico	$2\theta (^{\circ})$
1	20.20	5	46.19
2	28.72	6	50.90
3	35.36	7	55.28
4	41.07	8	59.42

Determine la estructura cristalina, los índices del plano que produce cada pico y el parámetro de red del material.

SOLUCIÓN

Se puede determinar primero el valor de $\sin^2\theta$ para cada pico, después dividir entre el denominador más bajo, 0.0308.

Pico	$2\theta(^{\circ})$	$\sin^2\theta$	$\sin^2\theta / 0.0308$	$h^2 + k^2 + l^2$	(hkl)
1	20.20	0.0308	1	2	(110)
2	28.72	0.0615	2	4	(200)
3	35.36	0.0922	3	6	(211)
4	41.07	0.1230	4	8	(220)
5	46.19	0.1539	5	10	(310)
6	50.90	0.1847	6	12	(222)
7	55.28	0.2152	7	14	(321)
8	59.42	0.2456	8	16	(400)

Cuando se hace esto se encuentra un patrón de valores de $\sin^2\theta / 0.0308$ de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8. Si el material fuera cúbico sencillo, el 7 no estaría presente, debido a que ningún plano tiene un valor de $h^2 + k^2 + l^2$ de 7. Por tanto, el patrón en realidad debe ser 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, ... y el material debe ser cúbico centrado en el cuerpo. Los valores de (hkl) listados dan estos valores de $h^2 + k^2 + l^2$ requeridos.

Se pueden usar entonces los valores de 2θ para cualquiera de los picos para calcular el espaciado interplanar y por tanto el parámetro de red. Al seleccionar el pico 8:

$$2\theta = 59.42^{\circ} \quad \text{o} \quad \theta = 29.71^{\circ}$$

$$d_{400} = \frac{\lambda}{2\sin\theta} = \frac{0.7107}{2\sin(29.71)} = 0.71699 \text{ \AA}$$

$$a_0 = d_{400}\sqrt{h^2 + k^2 + l^2} = (0.71699)(4) = 2.868 \text{ \AA}$$

Éste es el parámetro de red para el hierro cúbico centrado en el cuerpo.

Difracción y microscopía de electrones Louis de Broglie teorizó que los electrones se comportan como ondas. En la difracción de electrones se hace uso de electrones de alta energía (~100 000 a 400 000 eV). Estos electrones son difractados de las muestras electrónicas transparentes de los materiales. El haz de electrones que sale de la muestra también se utiliza para formar una imagen de la muestra. Por tanto, el microscopio electrónico de transmisión y la difracción de electrones se utilizan con el fin de obtener imágenes de las características microestructurales y para determinar las estructuras cristalinas.

¡Un electrón de 100 000 eV tiene una longitud de onda de alrededor de 0.004 nm! Esta longitud de onda ultrapequeña de electrones de energía alta permite que un **microscopio electrónico de transmisión** (MET) tome imágenes de manera simultánea de la microestructura a una escala muy fina. Si la muestra es muy gruesa, los electrones no pueden transmitirse a través de la muestra y no se observará una imagen o un patrón de difracción. Por tanto, en la microscopía electrónica de transmisión y en la difracción de electrones la muestra tiene que prepararse de tal manera que las porciones de ésta sean transparentes para los electrones. Un microscopio electrónico de transmisión es el instrumento utilizado para este propósito. La figura 3-38 muestra una imagen del MET y un patrón de difracción de electrones de un área de la muestra. Los puntos brillantes grandes corresponden a los granos de la matriz. Los puntos más pequeños se originan de los cristales pequeños de otra fase.

Otra ventaja del uso de un MET es la resolución espacial alta. Al utilizar un MET es posible determinar las diferencias entre las distintas regiones cristalinas y entre las regiones

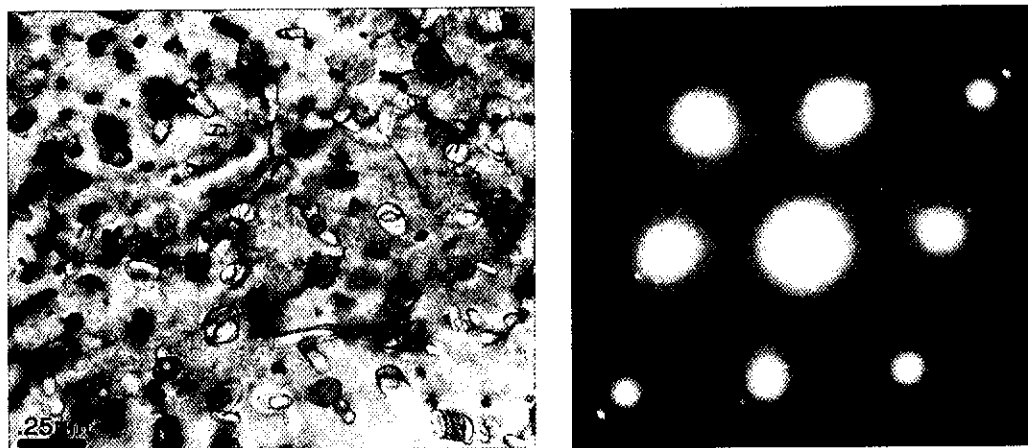


Figura 3-38 Micrografía de un MET de una muestra de una aleación de aluminio (Al-7055). El patrón de difracción a la derecha muestra puntos brillantes grandes que representan la difracción de los granos de la matriz de aluminio principal. Los puntos más pequeños se originan de los cristales a nanoescala de otro compuesto que está presente en la aleación de aluminio. (Cortesía del doctor Jörg M. K. Wiezorek, University of Pittsburgh.)

amorphas y cristalinas a escalas de longitud muy pequeñas ($\sim 1-10$ nm). Esta técnica analítica y sus variaciones (por ejemplo, la microscopía electrónica de alta resolución (MEAR), la microscopía electrónica de transmisión de barrido (METB), etc.) también se utilizan para determinar la orientación de los distintos granos y otras características microestructurales explicadas en capítulos posteriores. Las características avanzadas y especializadas asociadas con el MET también permiten el mapeo químico de los elementos en un material dado. Algunas de las desventajas asociadas con el MET incluyen

- a) el tiempo que consume la preparación de las muestras para que sean casi transparentes al haz de electrones;
- b) la cantidad de tiempo considerable y la habilidad requerida para el análisis de la información de una muestra delgada tridimensional que está representada en una imagen bidimensional y en el patrón de difracción;
- c) sólo se examina un volumen muy pequeño de la muestra, y
- d) el equipo es relativamente costoso y requiere de mucho cuidado en su uso.

En general, el MET se ha vuelto un método de investigación ampliamente usado y aceptado para el análisis de las características microestructurales a escalas de longitud micro y nano.

Resumen

- Los átomos o iones pueden arreglarse en los materiales sólidos con un orden de corto o largo alcances.
- Los materiales amorfos, como los vidrios de silicato, los vidrios metálicos, el silicio amorfo y muchos polímeros, sólo tienen un orden de corto alcance. Los materiales amorfos se forman cuando la cinética de un proceso involucrado en la fabricación de un material no permite que los átomos o iones asuman las posiciones de equilibrio. Estos materiales con frecuencia ofrecen propiedades inusuales nuevas. Varios materiales amorfos pueden cristalizarse de manera controlada. Ésta es la base para la formación de los vidrios-cerámicos y del reforzamiento de los plásticos PET utilizados para la fabricación de botellas.

- Los materiales cristalinos, incluyendo los metales y varias cerámicas, tienen orden de corto y largo alcance. La periodicidad de largo alcance en estos materiales está descrita por la estructura cristalina.
- Los arreglos atómicos o iónicos de los materiales cristalinos son descritos por siete sistemas cristalinos generales, los cuales incluyen 14 redes de Bravais específicas. Entre los ejemplos se incluyen las redes cúbica sencilla, cúbica centrada en el cuerpo, cúbica centrada en la cara y hexagonal.
- Una red es una colección de puntos organizados de manera única. La base o motivo se refiere a uno o más átomos asociados con cada punto de red. Una estructura cristalina está definida por la combinación de una red y una base. Aunque sólo existen 14 redes de Bravais, existen cientos de estructuras cristalinas.
- Una estructura cristalina se caracteriza por medio de los parámetros de red de la celda unitaria, la cual es la subdivisión más pequeña de la estructura cristalina que sigue describiendo la red. Otras características incluyen el número de puntos de red y los átomos por celda unitaria, el número de coordinación (o número de vecinos más cercanos) de los átomos en la celda unitaria y el factor de empaquetamiento de los átomos en la celda unitaria.
- Los materiales alotrópicos, o polimórficos, tienen más de una estructura cristalina posible. Las propiedades de los materiales pueden depender en gran medida del tipo de polimorfo o alótropo en particular. Por ejemplo, los polimorfos cúbico y tetragonal del titanato de bario tienen propiedades muy diferentes.
- Los átomos de los metales que tienen estructuras cristalinas cúbica centrada en la cara y compacta hexagonal están arreglados de tal manera que ocupan la mayor fracción del espacio. Las estructuras CCCa y CH logran el empaquetamiento más compacto por medio de distintas secuencias de apilamiento de los planos compactos de los átomos.
- La mayor fracción de empaquetamiento posible con esferas de un tamaño es 0.74 y es independiente del radio de las esferas (es decir, los átomos y los balones de basquetbol se empaquetan con la misma eficiencia siempre que se traten con un radio constante de un átomo y un tamaño fijo del balón de basquetbol).
- Los puntos, las direcciones y los planos dentro de la estructura cristalina pueden identificarse de manera formal por medio de la asignación de sus coordenadas y sus índices de Miller.
- Las propiedades mecánicas, magnéticas, ópticas y dieléctricas pueden diferir cuando se miden a lo largo de direcciones o planos distintos dentro de un cristal; en este caso, se dice que el cristal es anisotrópico. Si las propiedades son idénticas en todas las direcciones, el cristal es isotrópico. El efecto de la anisotropía cristalográfica puede estar enmascarado en un material cristalino debido a la orientación aleatoria de los granos.
- Los sitios intersticiales, u orificios entre los átomos normales en una estructura cristalina, pueden ser llenados por otros átomos o iones. La estructura cristalina de varios materiales cerámicos puede comprenderse considerando cómo están ocupados estos sitios. Los átomos o iones localizados en los sitios intersticiales desempeñan una función importante en el reforzamiento de los materiales, influyendo en las propiedades físicas de los materiales y controlando el procesamiento de los materiales.
- Las estructuras cristalinas de muchos materiales iónicos están formadas por el empaquetamiento de aniones (por ejemplo, iones oxígeno (O^{2-})). Los cationes entran en el poliedro de coordinación formado por los aniones. Estos poliedros por lo regular comparten esquinas y conducen a estructuras cristalinas. Las condiciones de la neutralidad de la carga y la estequiometría tienen que estar balanceadas. Las estructuras cristalinas de muchos materiales cerámicos (por ejemplo, Al_2O_3 , ZrO_2 , $YBa_2Cu_3O_{7-x}$) pueden racionalizarse a partir de estas consideraciones.
- Las estructuras cristalinas de los materiales enlazados de manera covalente tienden a ser abiertas. Entre algunos ejemplos se incluyen la cúbica del diamante (por ejemplo, Si, Ge).

- Aunque la mayoría de los plásticos de ingeniería tienden a ser amorfos, es posible tener una cristalinidad significativa en los polímeros y también es posible hacer crecer monocristales de ciertos polímeros.
- La DRX y la difracción de electrones se utilizan para la determinación de la estructura cristalina de los materiales cristalinos. La microscopía electrónica de transmisión también puede utilizarse para obtener imágenes de las características microestructurales en los materiales a escalas de longitud más pequeñas.

Glosario

Alotropía Característica de un elemento que es capaz de existir en más de una estructura cristalina, dependiendo de la temperatura y la presión.

Anisotrópico Que tiene propiedades diferentes en direcciones distintas.

Base Grupo de átomos asociados con un punto de red (lo mismo que el motivo).

Celda unitaria Subdivisión de la red que sigue manteniendo las características generales de la red completa.

Conjetura de Kepler Conjetura hecha por Johannes Kepler en 1611 que establece que la fracción de empaquetamiento máxima con esferas de tamaño uniforme no podía exceder $\pi/\sqrt{18}$. En 1998, Thomas Hales demostró que esta conjetura es verdadera.

Cristales líquidos (CL) Materiales poliméricos que por lo general son amorfos pero que pueden volverse parcialmente cristalinos cuando se les aplica un campo eléctrico externo. El efecto del campo eléctrico es reversible. Tales materiales se utilizan en las pantallas de cristal líquido.

Cristalización Proceso responsable de la formación de cristales, por lo general en un material amorfo.

Cristalización inducida por un esfuerzo Proceso de formación de cristales por medio de la aplicación de un esfuerzo externo. Por lo general, una fracción significativa de varios plásticos amorfos puede cristalizarse de esta manera, haciéndolos más resistentes.

Cristalografía Estudio formal de los arreglos de los átomos en los sólidos.

Cúbica del diamante (CD) Estructura cristalina cúbica del carbono, silicio y otros materiales enlazados de manera covalente.

Defecto Característica microestructural que representa una interrupción en el arreglo periódico perfecto de los átomos/iones en un material cristalino. Este término no se utiliza para comunicar la presencia de una falla en el material.

Defectos a nivel atómico Defectos como vacancias, dislocaciones, etc., que ocurren a una escala de longitud comparable a unas cuantas distancias interatómicas.

Densidad Masa por unidad de volumen de un material, por lo regular en unidades de g/cm^3 .

Densidad lineal Número de puntos de red por unidad de longitud a lo largo de una dirección.

Densidad planar Número de átomos por unidad de área cuyos centros se encuentran en el plano.

Difracción Interferencia, o reforzamiento constructivo de un haz de rayos x o electrones que interactúa con un material. El haz difractado provee información útil acerca de la estructura del material.

Difracción de electrones Método para determinar el nivel de cristalinidad a escalas de longitud relativamente pequeñas. Por lo regular conducido en un microscopio electrónico de transmisión.

Difracción de rayos x (DRX) Técnica para el análisis de materiales cristalinos utilizando un haz de rayos x.

Direcciones compactas Direcciones en un cristal a lo largo de las cuales los átomos están en contacto.

Direcciones de una forma o direcciones de una familia Direcciones cristalográficas que tienen las mismas características. Se denota por corchetes angulares $\langle \rangle$.

Distancia repetitiva Distancia de un punto de red al punto de red adyacente a lo largo de una dirección.

Espaciado interplanar Distancia entre dos planos paralelos adyacentes con los mismos índices de Miller.

Estructura compacta (C) Estructuras que muestran una fracción de empaquetamiento de 0.74 (CCCa y CH).

Estructura cristalina Arreglo de átomos en un material en una red repetitiva regular. Una estructura cristalina se describe por completo por medio de una red y una base.

Factor de empaquetamiento Fracción de espacio en una celda unitaria ocupada por átomos.

Fracción de empaquetamiento Fracción de una dirección (fracción de empaquetamiento lineal) o un plano (factor de empaquetamiento planar) que está cubierta en realidad por átomos o iones. Cuando se localiza un átomo en cada punto de red, la fracción de empaquetamiento lineal a lo largo de una dirección es el producto de la densidad lineal y el doble del radio atómico.

Grano Un cristal pequeño en un material policristalino.

Índices de Miller Notación abreviada para describir ciertas direcciones y planos cristalográficos en un material. Un número negativo se representa por medio de una barra sobre el número.

Índices de Miller-Bravais Notación abreviada especial para describir los planos cristalográficos en las celdas unitarias compactas hexagonales.

Isotrópico Que tiene las mismas propiedades en todas las direcciones.

Ley de Bragg Relación que describe el ángulo al cual un haz de rayos x de una longitud de onda particular se difracta de los planos cristalográficos de un espaciado interplanar dado.

Límites de granos Regiones entre los granos de un material policristalino.

Material policristalino Material que consiste en muchos granos.

Materiales amorfos Materiales, incluidos los vidrios, que no tienen orden de largo alcance, o estructura cristalina.

Materiales cristalinos Materiales que consisten en uno o muchos cristales o granos pequeños.

Microscopía electrónica de transmisión (MET) Técnica para la obtención de imágenes y el análisis de microestructuras utilizando un haz electrónico de energía alta.

Moldeado de estirado-soplado Proceso utilizado para formar botellas de plástico.

Motivo Grupo de átomos afiliados con un punto de red (lo mismo que la base).

Número de coordinación Número de vecinos más cercanos a un átomo en su arreglo atómico.

Orden de corto alcance (OCA) Arreglo regular y predecible de los átomos en un distancia corta, por lo regular de uno o dos espaciados atómicos.

Orden de largo alcance (OLA) Arreglo repetitivo regular de átomos en un sólido el cual se extiende sobre una distancia muy larga.

Parámetros de red Longitudes de los lados de la celda unitaria y los ángulos entre esos lados. Los parámetros de red describen el tamaño y la forma de la celda unitaria.

Plano basal Nombre especial dado al plano compacto en las celdas unitarias compactas hexagonales.

Planos de una forma o planos de una familia Planos cristalográficos que tienen las mismas características, aunque sus orientaciones son distintas. Se denotan por medio de llaves {}.

Polimorfismo Compuestos que exhiben más de un tipo de estructura cristalina.

Puntos de red Puntos que constituyen la red. Los entornos de cada punto de red son idénticos.

Radio atómico Radio aparente de un átomo, por lo regular se calcula a partir de las dimensiones de la celda unitaria, utilizando direcciones compactas (depende del número de coordinación).

Red Colección de puntos que divide el espacio en segmentos menores de igual tamaño.

Redes de Bravais Las 14 redes posibles que pueden crearse en tres dimensiones utilizando los puntos de red.

Secuencia de apilamiento Secuencia en la que se apilan los planos compactos. Si la secuencia es *ABABAB*, se produce una celda unitaria compacta hexagonal; si la secuencia es *ABCABCABC*, se produce una estructura cúbica centrada en la cara.

Sistemas cristalinos Arreglos cúbicos, tetragonales, ortorrómbicos, hexagonales, monoclinicos, romboédricos y triclinicos de puntos en el espacio que conducen a las 14 redes de Bravais y a cientos de estructuras cristalinas.

Sitio cúbico Posición intersticial que tiene un número de coordinación de ocho. Un átomo o ion en el sitio cúbico tiene ocho átomos o iones vecinos más cercanos.

Sitio octaédrico Posición intersticial que tiene un número de coordinación de seis. Un átomo o ion en el sitio octaédrico tiene seis átomos o iones vecinos más cercanos.

Sitio tetraédrico Posición intersticial que tiene un número de coordinación de cuatro. Un átomo o ion en el sitio tetraédrico tiene cuatro átomos o iones vecinos más cercanos.

Sitios intersticiales Localizaciones entre los átomos o iones “normales” en un cristal en los que se coloca otro átomo o ion, por lo regular distinto. Por lo general, el tamaño de esta ubicación intersticial es menor que el átomo o ion que se va a introducir.

Solidificación rápida Técnica utilizada para enfriar metales y aleaciones de manera muy rápida.

Tetraedro Estructura producida cuando se empaquetan átomos con una coordinación cuadruplicada.

Vidrio metálico Metales o aleaciones amorfos obtenidos utilizando solidificación rápida.

Vidrios Materiales sólidos no cristalinos (por lo regular derivados a partir del estado fundido) que sólo tienen orden atómico de corto alcance.

Vidrios-cerámicos Familia de materiales que se derivan por lo regular a partir de vidrios inorgánicos fundidos y procesados en materiales cristalinos con un tamaño de grano muy fino y con propiedades mecánicas mejoradas.

Problemas

Sección 3-1 Orden de corto alcance frente a orden de largo alcance

- 3-1** ¿Qué es un material “cristalino”?
- 3-2** ¿Qué es un monocristal?
- 3-3** Enuncie dos aplicaciones cualesquiera donde se utilicen monocristales.
- 3-4** ¿Qué es un material policristalino?
- 3-5** ¿Qué es un material de cristal líquido?
- 3-6** ¿Qué es un material amorfo?
- 3-7** ¿Por qué algunos materiales asumen una estructura amorfa?
- 3-8** Enuncie dos aplicaciones cualesquiera de los vidrios de silicato amorfos.

Sección 3-2 Materiales amorfos: principios y aplicaciones tecnológicas

- 3-9** ¿Qué significa el término vidrio-cerámico?
- 3-10** Compare de manera breve las propiedades mecánicas de los vidrios y los vidrios cerámicos.

Sección 3-3 Red, base, celdas unitarias y estructuras cristalinas

- 3-11** Defina los términos red, celda unitaria, base y estructura cristalina.
- 3-12** Explique por qué no existe la red de Bravais tetragonal centrada en la cara.

- 3-13** Calcule el radio atómico en cm para los siguientes:

- a) un metal CCCu con $a_0 = 0.3294$ nm y
- b) un metal CCCa con $a_0 = 4.0862$ Å.

- 3-14** Determine la estructura cristalina para los siguientes:

- a) un metal con $a_0 = 4.9489$ Å, $r = 1.75$ Å y un átomo por punto de red y
- b) un metal con $a_0 = 0.42906$ nm, $r = 0.1858$ nm y un átomo por punto de red.

- 3-15** La densidad del potasio, el cual tiene la estructura CCCu, es de 0.855 g/cm³. El peso atómico del potasio es de 39.09 g/mol. Calcule

- a) el parámetro de red y
- b) el radio atómico del potasio.

- 3-16** La densidad del torio, el cual tiene la estructura CCCa, es de 11.72 g/cm³. El peso atómico del torio es de 232 g/mol. Calcule

- a) el parámetro de red y
- b) el radio atómico del torio.

- 3-17** Un metal que tiene una estructura cúbica con una densidad de 2.6 g/cm³, un peso atómico de 87.62 g/mol y un parámetro de red de 6.0849 Å. Un átomo está asociado con cada punto de red. Determine la estructura cristalina del metal.

- 3-18** Un metal tiene una estructura cúbica con una densidad de 1.892 g/cm³, un peso atómico de 132.91 g/mol y un parámetro de red de 6.13 Å.

Un átomo está asociado con cada punto de red. Determine la estructura cristalina del metal.

- 3-19** El indio tiene una estructura tetragonal, con $a_0 = 0.32517$ nm y $c_0 = 0.49459$ nm. La densidad es de 7.286 g/cm³ y el peso atómico es de 114.82 g/mol. ¿El indio tiene la estructura tetragonal sencilla o la tetragonal centrada en el cuerpo?
- 3-20** El bismuto tiene una estructura hexagonal, con $a_0 = 0.4546$ nm y $c_0 = 1.186$ nm. La densidad es de 9.808 g/cm³ y el peso atómico es de 208.98 g/mol. Determine
- el volumen de la celda unitaria y
 - el número de átomos en cada celda unitaria.
- 3-21** El galio tiene una estructura ortorrómbica, con $a_0 = 0.45258$ nm, $b_0 = 0.45186$ nm y $c_0 = 0.76570$ nm. El radio atómico es de 0.1218 nm. La densidad es de 5.904 g/cm³ y el peso atómico es de 69.72 g/mol. Determine
- el número de átomos en cada celda unitaria y
 - el factor de empaquetamiento en la celda unitaria.
- 3-22** El berilio tiene una estructura cristalina hexagonal, con $a_0 = 0.22858$ nm y $c_0 = 0.35842$ nm. El radio atómico es de 0.1143 nm, la densidad es de 1.848 g/cm³ y el peso atómico es de 9.01 g/mol. Determine
- el número de átomos en cada celda unitaria y
 - el factor de empaquetamiento en la celda unitaria.
- 3-23** Un clip de papel típico pesa 0.59 g y consiste en hierro CCCu. Calcule
- el número de celdas unitarias y
 - el número de átomos de hierro en el clip de papel. (Véase el apéndice A para obtener la información requerida.)
- 3-24** La hoja de aluminio utilizada para envolver alimentos es de aproximadamente 0.001 pulg de grosor. Suponga que todas las celdas unitarias del aluminio están arregladas de tal manera que a_0 es perpendicular a la superficie de la hoja. Para un cuadrado de 4×4 pulg de la hoja, determine
- el número total de celdas unitarias en el papel y
 - el grosor de la hoja en número de celdas unitarias. (Véase el apéndice A.)
- 3-25** El rutilo es el nombre dado a una estructura cristalina adoptada por lo común por los compuestos de la forma AB_2 , donde A representa un átomo de un metal y B representa átomos de

oxígeno. Una forma del rutilo tiene átomos del elemento A en las coordenadas de la celda unitaria $(0, 0, 0)$ y $(1/2, 1/2, 1/2)$ y átomos del elemento B en $(1/4, 1/4, 0)$, $(3/4, 3/4, 0)$, $(3/4, 1/4, 1/2)$ y $(1/4, 3/4, 1/2)$. Los parámetros de la celda unitaria son $a = b \neq c$ y $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$. Observe que el parámetro de red c por lo regular es menor que los parámetros de red a y b para la estructura del rutilo.

- ¿Cuántos átomos del elemento A hay por celda unitaria?
 - ¿Cuántos átomos del elemento B hay por celda unitaria?
 - ¿Su respuesta al inciso b) es consistente con la estequiometría de un compuesto AB_2 ? Explique.
 - Dibuje la celda unitaria para el rutilo. Utilice un símbolo distinto para cada tipo de átomo. Proporcione una leyenda que indique qué símbolo representa a qué tipo de átomo.
 - Para la red tetragonal sencilla, $a = b \neq c$ y $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$. Hay un punto de red por celda unitaria localizado en las esquinas de la red tetragonal sencilla. Describa la estructura del rutilo como una red tetragonal sencilla y una base.
- 3-26** Considere la estructura cristalina del CuAu. Puede describirse como una red cúbica sencilla con una base de Cu $(0, 0, 0)$, Cu $(1/2, 1/2, 0)$, Au $(1/2, 0, 1/2)$ y Au $(0, 1/2, 1/2)$.
- ¿Cuántos átomos de cada tipo hay por celda unitaria?
 - Dibuje la celda unitaria para el CuAu. Utilice un símbolo distinto para cada tipo de átomo. Provea una leyenda que indique qué símbolo representa a qué tipo de átomo.
 - Dé una representación de red y base alterna para el CuAu para la que un átomo de la base sea Au $(0, 0, 0)$.
 - Una estructura cristalina relacionada es la del Cu_3Au . Esta celda unitaria es similar a la celda unitaria cúbica centrada en la cara con el Au en las esquinas de la celda unitaria y Cu en todas las posiciones centradas en la cara. Describa la estructura como una red y una base.
 - La estructura cristalina del Cu_3Au es similar a la estructura cristalina CCCa, pero no tiene la red cúbica centrada en la cara. Explique de manera breve por qué es éste el caso.
- 3-27** Los nanoalambres son alambres de metal o semiconductores con una razón dimensional

alta con diámetros en el orden de 1 a 100 nanómetros y longitudes comunes de 1 a 100 micrones. Los nanoalambres probablemente se ocupen en el futuro para crear circuitos electrónicos de alta densidad.

Los nanoalambres pueden fabricarse a partir de ZnO. El ZnO tiene la estructura de la wurtzita. La estructura de la wurtzita es una red hexagonal con cuatro átomos por punto de red en Zn (0, 0, 0), Zn (2/3, 1/3, 1/2), O (0, 0, 3/8) y O (2/3, 1/3, 7/8).

- ¿Cuántos átomos hay en la celda unitaria convencional?
- Si los átomos se localizaran en Zn (0, 0, 0), Zn (1/3, 2/3, 1/2), O (0, 0, 3/8) y O (1/3, 2/3, 7/8), ¿sería diferente la estructura? Explique, por favor.
- Para el ZnO, los parámetros de celda unitaria son $a = 3.24 \text{ \AA}$ y $c = 5.19 \text{ \AA}$. (Nota: Ésta no es la razón c/a CH ideal.) Un nanoalambre de ZnO común es de 20 nm de diámetro y 5 μm de largo. Suponga que los nanoalambres son cilíndricos. ¿Aproximadamente cuántos átomos hay en un nanoalambre sencillo de ZnO?

- 3-28** Calcule la fracción de empaquetamiento atómico para la estructura cristalina compacta hexagonal para la que $c = \sqrt{\frac{8}{3}}a$. Recuerde que la base de la celda unitaria es un paralelogramo.

Sección 3-4 Transformaciones alotrópicas y polimórficas

- 3-29** ¿Cuál es la diferencia entre un alótropo y un polimorfo?
- 3-30** ¿Cuáles son los diferentes polimorfos de la zirconia?
- 3-31** Arriba de los 882 °C, el titanio tiene una estructura cristalina CCCu, con $a = 0.332 \text{ nm}$. Debajo de esa temperatura, el titanio tiene una estructura CH con $a = 0.2978 \text{ nm}$ y $c = 0.4735 \text{ nm}$. Determine el cambio porcentual en el volumen cuando el titanio CCCu se transforma en titanio CH. ¿Es esto una contracción o una expansión?
- 3-32** El Mn- α tiene una estructura cúbica con $a_0 = 0.8931 \text{ nm}$ y una densidad de 7.47 g/cm³. El Mn- β tiene una estructura cúbica con $a_0 = 0.6326 \text{ nm}$ y una densidad de 7.26 g/cm³. El peso atómico del manganeso es de 54.938

g/mol y el radio atómico es de 0.112 nm. Determine el cambio porcentual en el volumen que ocurriría si se transformara el Mn- α en Mn- β .

- 3-33** Calcule la densidad teórica de los tres polimorfos de la zirconia. Las constantes de red para la forma monoclinica son $a = 5.156$, $b = 5.191$ y $c = 5.304 \text{ \AA}$, respectivamente. El ángulo β para la celda unitaria monoclinica es 98.9°. Las constantes de red para la celda unitaria tetragonal son $a = 5.094$ y $c = 5.304 \text{ \AA}$, respectivamente. La zirconia cúbica tiene una constante de red de 5.124 $\text{\AA}$.
- 3-34** A partir de la información en este capítulo, calcule el cambio en el volumen que ocurrirá cuando se transforma la forma cúbica de la zirconia en la forma tetragonal.
- 3-35** La zirconia monoclinica no puede utilizarse de manera efectiva para la fabricación de sensores de oxígeno u otros dispositivos. Explique.
- 3-36** ¿Qué significa el término zirconia estabilizada?
- 3-37** Enuncie dos aplicaciones cualesquiera de las cerámicas de zirconia estabilizada.

Sección 3-5 Puntos, direcciones y planos en la celda unitaria

- 3-38** Explique la importancia de las direcciones cristalográficas utilizando un ejemplo de una aplicación.
- 3-39** ¿Por qué las aleaciones de Fe-Si utilizadas en aplicaciones magnéticas tienen “grano orientado”?
- 3-40** ¿Cómo influye la dirección cristalográfica en las propiedades magnéticas utilizadas en materiales aplicados a medios de grabación magnética?
- 3-41** Determine los índices de Miller para las direcciones en la celda unitaria cúbica mostrada en la figura 3-39.

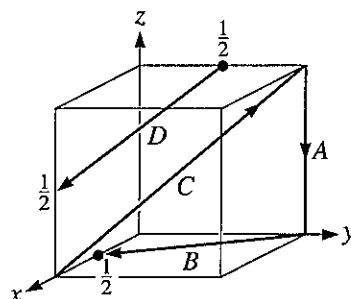


Figura 3-39 Direcciones en una celda unitaria cúbica para el problema 3-41.

3-42 Determine los índices para las direcciones en la celda unitaria cúbica mostrada en la figura 3-40.

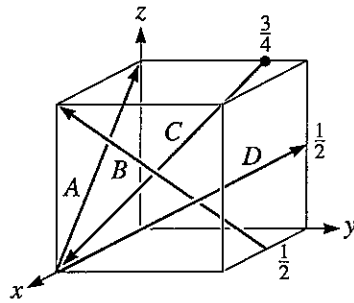


Figura 3-40 Direcciones en una celda unitaria cúbica para el problema 3-42.

3-43 Determine los índices para los planos en la celda unitaria cúbica mostrada en la figura 3-41.

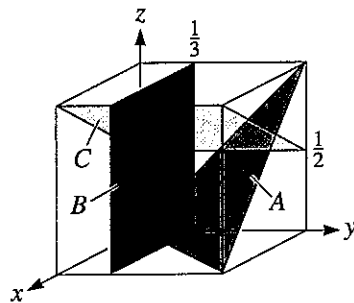


Figura 3-41 Planos en una celda unitaria cúbica para el problema 3-43.

3-44 Determine los índices para los planos en la celda unitaria cúbica mostrada en la figura 3-42.

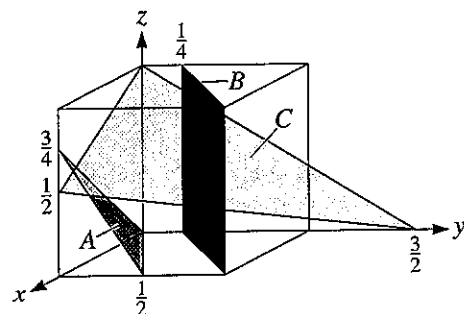


Figura 3-42 Planos en una celda unitaria cúbica para el problema 3-44.

3-45 Determine los índices para las direcciones en la red hexagonal mostrada en la figura 3-43, utilizando los sistemas de tres y cuatro dígitos.

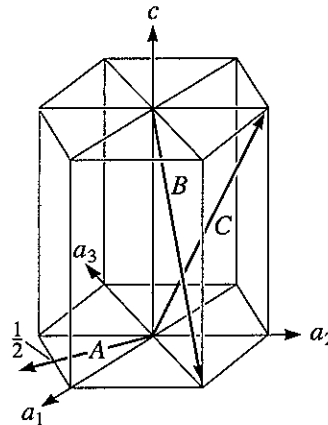


Figura 3-43 Direcciones en una red hexagonal para el problema 3-45.

3-46 Determine los índices para las direcciones en la red hexagonal mostrada en la figura 3-44, utilizando los sistemas de tres y cuatro dígitos.

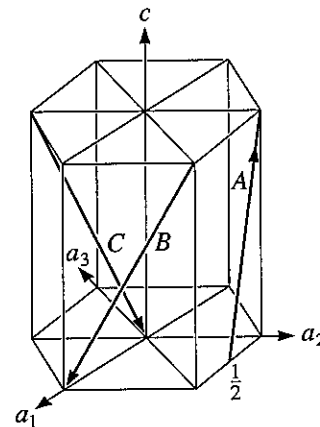


Figura 3-44 Direcciones en una red hexagonal para el problema 3-46.

- 3-47** Determine los índices para los planos en la red hexagonal mostrada en la figura 3-45.

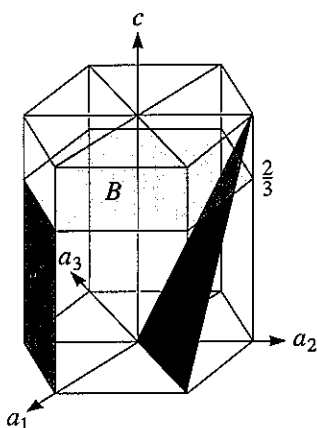


Figura 3-45 Planos en una red hexagonal para el problema 3-47.

- 3-48** Determine los índices para los planos en la red hexagonal mostrada en la figura 3-46.

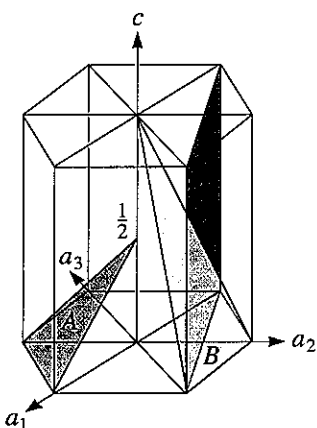


Figura 3-46 Planos en una red hexagonal para el problema 3-48.

- 3-49** Trace los siguientes planos y direcciones dentro de una celda unitaria cúbica:

a) $[101]$ b) $[0\bar{1}0]$ c) $[12\bar{2}]$ d) $[301]$
 e) $[\bar{2}01]$ f) $[2\bar{1}3]$ g) $(0\bar{1}\bar{1})$ h) (102)
 i) (002) j) $(1\bar{3}0)$ k) $(\bar{2}12)$ l) $(3\bar{1}\bar{2})$

- 3-50** Trace los siguientes planos y direcciones dentro de una celda unitaria cúbica:

a) $[1\bar{1}0]$ b) $[\bar{2}\bar{2}1]$ c) $[410]$ d) $[0\bar{1}2]$
 e) $[\bar{3}\bar{2}1]$ f) $[1\bar{1}1]$ g) $(11\bar{1})$ h) $(01\bar{1})$
 i) (030) j) $(\bar{1}21)$ k) $(11\bar{3})$ l) $(0\bar{4}1)$

- 3-51** Trace los siguientes planos y direcciones dentro de una celda unitaria hexagonal:

a) $[01\bar{1}0]$ b) $[11\bar{2}0]$ c) $[\bar{1}011]$
 d) (0003) e) $(\bar{1}010)$ f) $(01\bar{1}1)$

- 3-52** Trace los siguientes planos y direcciones dentro de una celda unitaria hexagonal:

a) $[\bar{2}110]$ b) $[11\bar{2}1]$ c) $[10\bar{1}0]$
 d) $(1\bar{2}10)$ e) $(\bar{1}\bar{1}22)$ f) $(12\bar{3}0)$

- 3-53** ¿Cuáles son los índices de las seis direcciones de la forma $\langle 110 \rangle$ que se encuentran en el plano $(11\bar{1})$ de una celda cúbica?

- 3-54** ¿Cuáles son los índices de las cuatro direcciones de la forma $\langle 111 \rangle$ que se encuentran en el plano $(\bar{1}01)$ de una celda cúbica?

- 3-55** Determine el número de direcciones de la forma $\langle 110 \rangle$ en una celda unitaria tetragonal y compárelo con el número de direcciones de la forma $\langle 110 \rangle$ en una celda unitaria ortorrómbica.

- 3-56** Determine el ángulo entre la dirección $[110]$ y el plano (110) en una celda unitaria tetragonal; después determine el ángulo entre la dirección $[011]$ y el plano (011) en una celda tetragonal. Los parámetros de red son $a_0 = 4.0 \text{ \AA}$ y $c_0 = 5.0 \text{ \AA}$. ¿Qué es responsable de la diferencia?

- 3-57** Determine los índices de Miller del plano que pasa a través de tres puntos que tienen las siguientes coordenadas:

a) $0, 0, 1$; $1, 0, 0$; y $1/2, 1/2, 0$
 b) $1/2, 0, 1$; $1/2, 0, 0$; y $0, 1, 0$
 c) $1, 0, 0$; $0, 1, 1/2$; y $1, 1/2, 1/4$
 d) $1, 0, 0$; $0, 0, 1/4$; y $1/2, 1, 0$

- 3-58** Determine la distancia repetitiva, la densidad lineal y la fracción de empaquetamiento para el níquel CCCa, el cual tiene un parámetro de red de 0.35167 nm , en las direcciones $[100]$, $[110]$ y $[111]$. ¿Cuál de estas direcciones es compacta?

- 3-59** Determine la distancia repetitiva, la densidad lineal y la fracción de empaquetamiento para el litio CCCu, el cual tiene un parámetro de red de 0.35089 nm , en las direcciones $[100]$, $[110]$ y $[111]$. ¿Cuál de estas direcciones es compacta?

- 3-60** Determine la distancia repetitiva, la densidad lineal y la fracción de empaquetamiento para el magnesio CH en la dirección $[2110]$ y en la dirección $[11\bar{2}0]$. En el apéndice A se dan los parámetros de red para el magnesio CH.

- 3-61** Determine la densidad y la fracción de empaquetamiento planares para el níquel CCCa en los planos (100) , (110) y (111) . ¿Cuáles de estos planos, si los hay, son compactos?

3-62 Determine la densidad y la fracción de empaquetamiento planares para el litio CCCu en los planos (100), (110) y (111). ¿Cuáles de estos planos, si los hay, son compactos?

3-63 Suponga que el rodio CCCa se produce como un hoja de 1 mm de grosor, con el plano (111) paralelo a la superficie de la hoja. ¿De cuántos espaciados interplanares (111) de d_{111} de grosor es la hoja? Vea el apéndice A para la información necesaria.

3-64 En la celda unitaria CCCa, ¿cuántos d_{111} están presentes entre el punto 0, 0, 0 y el punto 1, 1, 1?

3-65 ¿Cuáles son las secuencias de apilamiento en las estructuras CCCa y CH?

Sección 3-6 Sitios intersticiales

3-66 Determine el radio mínimo de un átomo que quepa en

- el sitio intersticial tetraédrico en el níquel CCCa y en
- el sitio intersticial octaédrico en el litio CCCu.

3-67 ¿Cuáles son los números de coordinación para los sitios octaédricos y tetraédricos?

Sección 3-7 Estructuras cristalinas de los materiales iónicos

3-68 ¿Cuál es el radio de un átomo que quepa en el sitio octaédrico en el cobre CCCa sin alterar la estructura cristalina?

3-69 Utilizando los radios iónicos dados en el apéndice B, determine el número de coordinación esperado para los siguientes compuestos:

- Y_2O_3
- UO_2
- BaO
- Si_3N_4
- GeO_2
- MnO
- MgS
- KBr

3-70 Una celda unitaria particular es cúbica con iones del tipo A localizados en las esquinas y centrados en las caras de la celda unitaria y iones del tipo B ubicados en el punto medio de cada arista del cubo y en la posición centrada en el cuerpo. Los iones contribuyen a la celda unitaria de la manera usual (una contribución de $1/8$ de ion por cada ion en las esquinas, etcétera).

- ¿Cuántos iones de cada tipo hay por celda unitaria?
- Describa la estructura como una red y una base. Asegúrese de que el número de iones por unidad de celda unitaria dado por su descripción de la estructura como

una red y una base es consistente con su respuesta al inciso a).

c) ¿Cuál es el número de coordinación de cada ion?

d) ¿Cuál es el nombre dado por lo general a esta estructura cristalina?

3-71 ¿Esperaría que el NiO tenga la estructura del cloruro de cesio, del cloruro de sodio o de la blenda de zinc? Con base en su respuesta, determine

- el parámetro de red,
- la densidad y
- el factor de empaquetamiento.

3-72 ¿Esperaría que el UO_2 tenga la estructura del cloruro de sodio, de la blenda de zinc o de la fluorita? Con base en su respuesta, determine

- el parámetro de red,
- la densidad y
- el factor de empaquetamiento.

3-73 ¿Esperaría que el BeO tenga la estructura del cloruro de sodio, de la blenda de zinc o de la fluorita? Con base en su respuesta, determine

- el parámetro de red,
- la densidad y
- el factor de empaquetamiento.

3-74 ¿Esperaría que el CsBr tenga la estructura del cloruro de sodio, de la blenda de zinc, de la fluorita o del cloruro de cesio? Con base en su respuesta, determine

- el parámetro de red,
- la densidad y
- el factor de empaquetamiento.

3-75 Trace el arreglo de los iones del plano (110) del ZnS (con la estructura de la blenda de zinc) y compare este arreglo con el de un plano (110) del CaF_2 (con la estructura de la fluorita). Compare la fracción de empaquetamiento planar en los planos (110) para estos dos materiales.

3-76 El MgO, el cual tiene la estructura del cloruro de sodio, tiene un parámetro de red de 0.396 nm. Determine la densidad planar y la fracción de empaquetamiento planar para los planos (111) y (222) del MgO. ¿Qué iones están presentes en cada plano?

3-77 Dibuje la estructura cristalina del polimorfo de perovskita del PZT ($Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$, x: fracción molar del Zr^{+4}). Suponga que los dos cationes en el sitio B ocupan aleatoriamente posiciones en el sitio B.

Sección 3-8 Estructuras covalentes

3-78 Calcule la densidad teórica del Sn- α . Suponga que el Sn- α tiene la estructura cúbica del diamante y obtenga la información del radio a partir del apéndice B.

3-79 Calcule la densidad teórica del Ge. Suponga que el Ge tiene la estructura cúbica del diamante y obtenga la información del radio atómico a partir del apéndice B.

Sección 3-9 Técnicas de difracción para el análisis de estructuras cristalinas

3-80 Se observa un haz de rayos x difractados de los planos (220) del hierro a un ángulo 2θ de 99.1° cuando se utilizan rayos x de longitud de onda de 0.15418 nm. Calcule el parámetro de red del hierro.

3-81 Se observa un haz de rayos x difractados de los planos (311) del aluminio a un ángulo 2θ de 78.3° cuando se utilizan rayos x de longitud de onda de 0.15418 nm. Calcule el parámetro de red del aluminio.

3-82 La figura 3-47 muestra los resultados de un experimento de difracción de rayos x en la forma de la intensidad del pico difractado en función del ángulo de difracción 2θ . Si se utilizaron rayos x con una longitud de onda de 0.15418 nm, determine

- la estructura cristalina del metal,
- los índices de los planos que producen cada uno de los picos y
- el parámetro de red del metal.

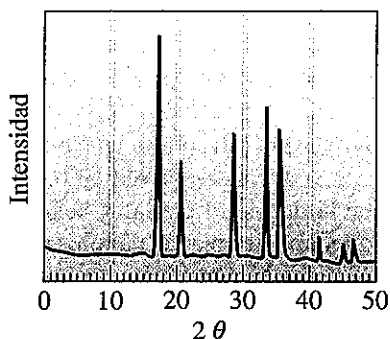


Figura 3-47 Patrón de DRX para el problema 3-82.

3-83 La figura 3-48 muestra los resultados de un experimento de difracción de rayos x en la

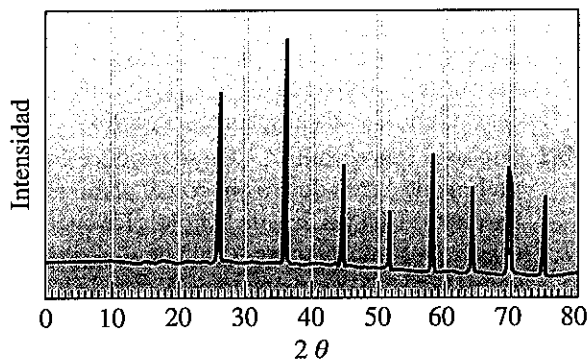


Figura 3-48 Patrón de DRX para el problema 3-83.

forma de la intensidad del pico difractado en función del ángulo de difracción 2θ . Si se utilizaron rayos x con una longitud de onda de 0.07107 nm, determine

- la estructura cristalina del metal,
- los índices de los planos que produce cada uno de los picos y
- el parámetro de red del metal.

3-84 Una muestra de zirconia contiene polimorfos cúbicos y monoclinicos. ¿Cuál será una buena técnica analítica para detectar la presencia de estos dos polimorfos distintos?

Problemas de diseño

3-85 Desea clasificar especímenes de hierro, algunos de los cuales son CCCa y otros CCCu. Diseñe un método de difracción de rayos x por medio del cual pueda lograrse esto.

3-86 Desea diseñar un material para la fabricación de utensilios de cocina para cocinar. El material debe ser transparente y soportar el calentamiento y el enfriamiento repetidos. ¿Qué tipo de materiales podrían utilizarse para diseñar tal artículo de cocina transparente y durable?

Problemas de cómputo

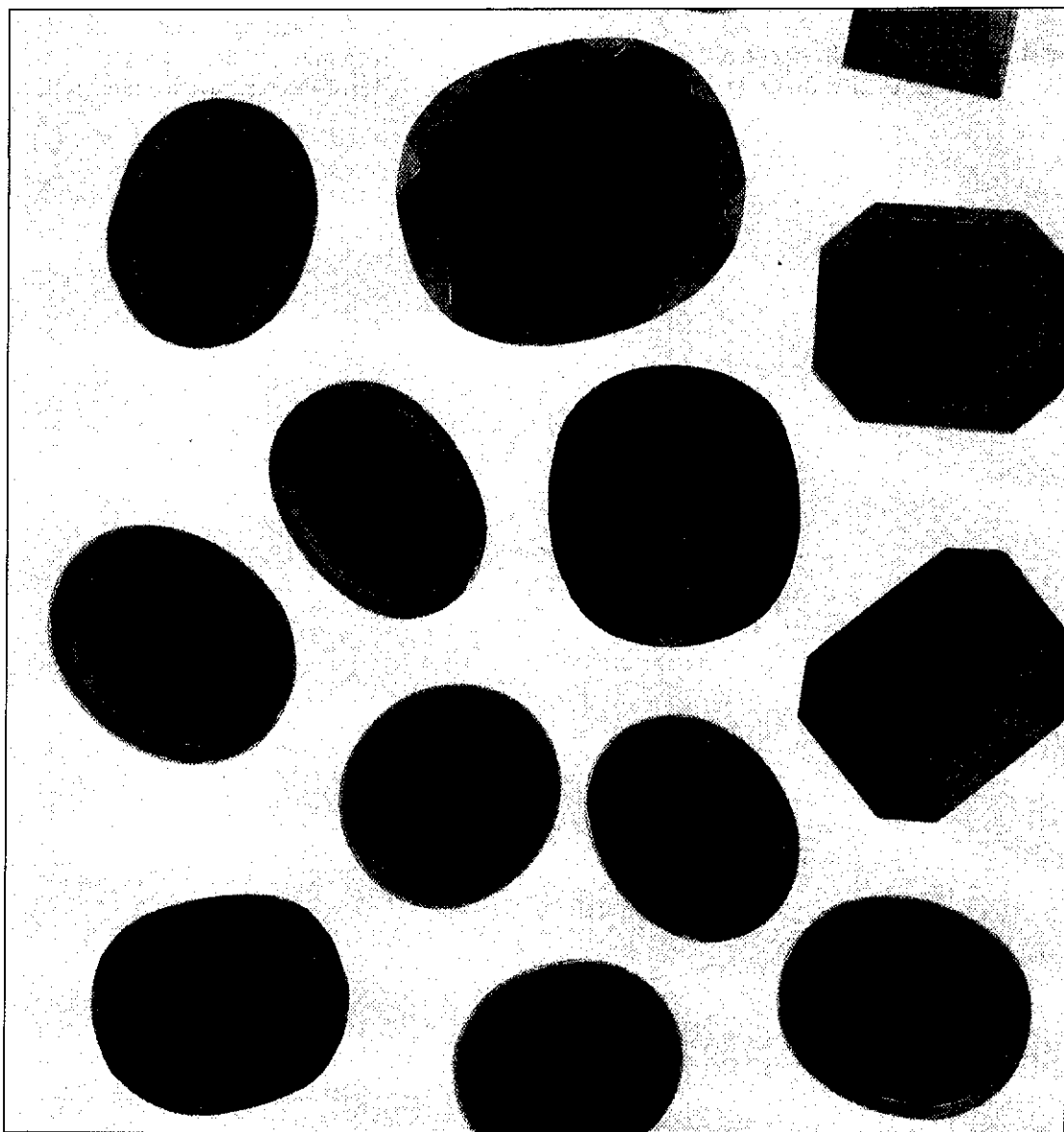
Nota: Debe consultar a su instructor en el uso de un lenguaje de programación. En principio, no importa cuál lenguaje de programación se utilice. Algunas sugerencias son el uso de C/C++ o Java. Si éstos no están disponibles, también puede resolver la mayoría de estos problemas utilizando un programa de hoja de cálculo.

- 3-87** La tabla 3-1 contiene las fórmulas para obtener los volúmenes de distintos tipos de celdas unitarias. Escriba un programa de cómputo para calcular el volumen de la celda unitaria en las unidades de $\text{\AA}^3$ y nm^3 . Su programa debe pedirle al usuario que ingrese a) el tipo de celda unitaria, b) las constantes de red necesarias y c) los ángulos. El programa debe reconocer las entradas hechas y utilizar la fórmula apropiada para el cálculo del volumen de la celda unitaria.
- 3-88** Escriba un programa de cómputo que le pida al usuario introducir la masa atómica, el

radio atómico y la estructura cristalina cúbica para un elemento. La salida del programa debe ser la fracción de empaquetamiento y la densidad teórica.

Knovel® Problemas

- K3-1** Determine los parámetros de red cristalina y las densidades de masa para los semiconductores GaN, GaP, GaAs, GaSb, InN, InP, InAs e InSb. Compare la información para los parámetros de red de al menos dos fuentes distintas.



¿Qué hace rojo al rubí? La adición de alrededor de 1% de óxido de cromo en la alúmina crea defectos. Una transición electrónica entre los niveles de defectos produce el cristal de rubí rojo. De manera similar, la incorporación de Fe^{+2} y Ti^{+4} forma el zafiro azul. (Cortesía de Lawrence Lawry/PhotoDisc/Getty Images.)

Imperfecciones en los arreglos atómicos e iónicos

¿Se ha preguntado alguna vez?

- ¿Por qué los cristales de silicio utilizados en la fabricación de obleas de semiconductores contienen pequeñas cantidades de dopantes, tales como fósforo o boro?
- ¿Qué hace que el acero sea considerablemente más duro y resistente que el hierro puro?
- ¿Qué limita la capacidad de transportar corriente eléctrica de un superconductor cerámico?
- ¿Por qué se utiliza el cobre de alta pureza como conductor en aplicaciones eléctricas?
- ¿Por qué los metales CCCa (como el cobre y el aluminio) tienden a ser más dúctiles que los metales CCCu y CH?
- ¿Cómo pueden reforzarse los metales?

El arreglo de los átomos o iones en los materiales de ingeniería contiene imperfecciones o defectos. Estos defectos tienen con frecuencia un efecto profundo sobre las propiedades de los materiales. En este capítulo se introducen los tres tipos básicos de imperfecciones: defectos puntuales, defectos lineales (o dislocaciones) y defectos superficiales. Estas imperfecciones sólo representan defectos en o desviaciones de los arreglos atómicos o iónicos perfectos o ideales esperados en una estructura cristalina dada. Al material no se le considera defectuoso desde un punto de vista tecnológico. En muchas aplicaciones, la presencia de tales defectos es en realidad útil. Sin embargo, existen unas cuantas aplicaciones en donde se tratará de minimizar un tipo de defecto en particular. Por ejemplo, los defectos conocidos como dislocaciones son útiles para aumentar la resistencia de los metales y aleaciones; sin embargo, en el silicio monocristalino, utilizado para la fabricación de chips de computadoras, no es deseable la presencia de dislocaciones. Con frecuencia se pueden crear "defectos" de manera intencional para producir un conjunto deseado de propiedades electrónicas, magnéticas, ópticas o mecánicas. Por ejemplo, el hierro puro es relativamente blando, aunque cuando se le adiciona una pequeña cantidad de carbono, se crean defectos en el arreglo cristalino del hierro y se transforma en un acero al carbono simple que presenta una resistencia considerablemente alta. De manera similar, un cristal de alúmina pura es transparente e incoloro, pero, cuando se

le adiciona una pequeña cantidad de cromo se crea un defecto especial, que resulta en un cristal de rubí rojo hermoso. En el procesamiento de cristales de Si para la microelectrónica, se adicionan concentraciones muy pequeñas de átomos de P o B al Si. Estas adiciones crean defectos en el arreglo de los átomos en el silicio que imparten propiedades eléctricas especiales a las diferentes partes del cristal de silicio. A su vez, esto permite fabricar dispositivos útiles como transistores —bloques de construcción básicos que permitieron el desarrollo de las computadoras modernas y la revolución de la tecnología de la información—. Sin embargo, el efecto de los defectos puntuales no siempre es deseable. Cuando se desea utilizar el cobre como un conductor para la microelectrónica, se utiliza la pureza más alta disponible. ¡Esto se debe a que incluso niveles pequeños de impurezas ocasionarán un incremento de órdenes de magnitud en la resistividad eléctrica del cobre!

Los límites de granos, regiones entre distintos granos de un material policristalino, representan un tipo de defecto. Los superconductores cerámicos, bajo ciertas condiciones, pueden conducir electricidad sin ninguna resistencia eléctrica. Los científicos e ingenieros de materiales han fabricado alambres o cintas largas de tales materiales. También han descubierto que, aunque la corriente eléctrica fluye bastante bien dentro de los granos de un superconductor policristalino, existe una resistencia considerable al flujo de corriente de un grano a otro —a través del límite de grano—. Por otro lado, la presencia de los límites de grano en realidad ayuda a endurecer materiales metálicos. En capítulos posteriores se mostrará cómo se pueden controlar las concentraciones de estos defectos mediante ajuste de la composición o de las técnicas de procesamiento. En este capítulo se explora la naturaleza y los efectos de los distintos tipos de defectos.

4-1 Defectos puntuales

Los **defectos puntuales** son perturbaciones localizadas en los arreglos iónicos o atómicos en una estructura cristalina que de otra manera sería perfecta. Aun cuando se les llama defectos puntuales, la perturbación afecta una región que involucra varios átomos o iones. Estas imperfecciones, mostradas en la figura 4-1, pueden ser introducidas por el movimiento de los átomos o iones cuando ganan energía al calentarse, durante el procesamiento del material o por la

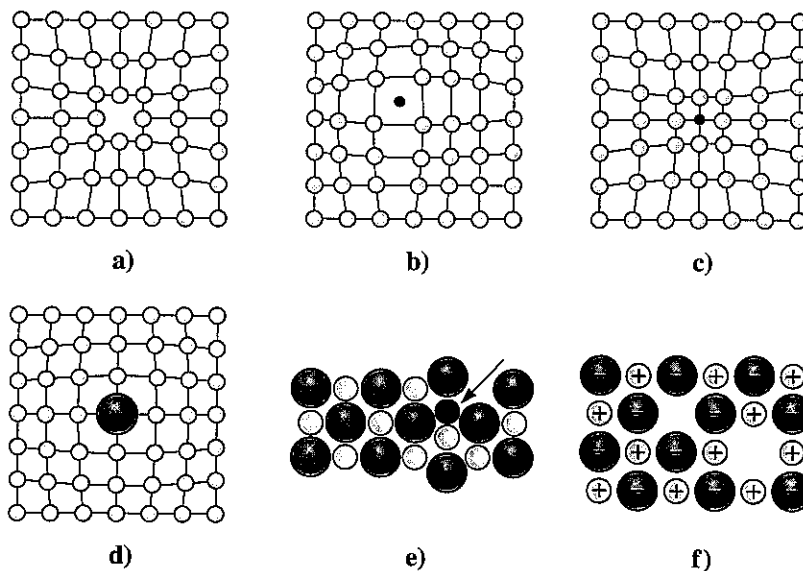


Figura 4-1 Defectos puntuales: a) vacancia, b) átomo intersticial, c) átomo sustitucional pequeño, d) átomo sustitucional grande, e) defecto de Frenkel y f) defecto de Schottky. Todos estos defectos perjudican el arreglo perfecto de los átomos cercanos.

introducción intencional o no intencional de impurezas. Por lo general, las **impurezas** son elementos o compuestos que se presentan a partir de las materias primas o del procesamiento. Por ejemplo, los cristales de silicio crecen en crisoles de cuarzo que contienen oxígeno como impureza. Por otro lado, los **dopantes** son elementos o compuestos que se adicionan de manera deliberada, en concentraciones conocidas, en localizaciones específicas en la microestructura, con un efecto benéfico deseado sobre las propiedades o el procesamiento. En general, el efecto de las impurezas es perjudicial, mientras que el efecto de los dopantes sobre las propiedades de los materiales es útil. El fósforo (P) y el boro (B) son ejemplos de dopantes que se adicionan a cristales de silicio para mejorar las propiedades eléctricas del silicio puro (Si).

Por lo general un defecto puntual involucra un átomo o ion, o un par de átomos o iones, y por tanto es distinto de los **defectos extendidos**, como las dislocaciones o los límites de grano. Un “punto” importante acerca de los defectos puntuales es que aunque los defectos aparecen en uno o dos sitios, su presencia se “siente” a distancias mucho mayores en el material cristalino.

Vacancias Se produce una **vacancia** cuando un átomo o un ion está ausente de su sitio normal en la estructura cristalina, como en la figura 4-1a). Cuando los átomos o iones están ausentes (es decir, cuando se presentan vacancias), aumenta la aleatoriedad o entropía general del material, lo cual incrementa la estabilidad termodinámica de un material cristalino. Todos los materiales cristalinos tienen defectos de vacancia. Éstas se introducen en los metales y aleaciones durante la solidificación, a altas temperaturas, o como consecuencia del daño de la radiación. Las vacancias desempeñan una función importante en la determinación de la velocidad a la cual los átomos o iones se mueven alrededor de o se difunden en un material sólido, especialmente en los metales puros. En el capítulo 5 se verá esto con mayor detalle.

A temperatura ambiente (~ 298 K), la concentración de vacancias es pequeña, pero la concentración de éstas aumenta exponencialmente a medida que se incrementa la temperatura, como se muestra por medio del siguiente comportamiento de tipo Arrhenius:

$$n_v = n \exp \left(\frac{-Q_v}{RT} \right) \quad (4-1)$$

donde

n_v es el número de vacancias por cm^3 ;

n es el número de átomos por cm^3 ;

Q_v es la energía requerida para producir un mol de vacancias, en cal/mol o joules/mol;

R es la constante de los gases, $1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ u $8.314 \frac{\text{joules}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$, y

T es la temperatura en kelvins.

Debido a la gran energía térmica cerca de la temperatura de fusión, puede haber hasta una vacancia por cada 1000 átomos. Observe que esta ecuación provee la concentración de equilibrio de las vacancias a una temperatura dada. También es posible mantener una concentración de las vacancias producidas a una alta temperatura enfriando rápidamente el material. Por tanto, en muchas situaciones, la concentración de las vacancias observadas a temperatura ambiente no es la concentración de equilibrio pronosticada por la ecuación 4-1.

Ejemplo 4-1

Efecto de la temperatura sobre las concentraciones de vacancias

Calcule la concentración de las vacancias en el cobre a temperatura ambiente (25°C). ¿Qué temperatura se necesitará para tratar térmicamente el cobre de tal manera que la concentración de las vacancias producidas sea 1000 veces mayor que la concentración de equilibrio de las vacancias a temperatura ambiente? Suponga que se requieren 20 000 cal para producir un mol de vacancias en el cobre.

SOLUCIÓN

El parámetro de red del cobre CCCa es de 0.36151 nm. Hay cuatro átomos por celda unitaria; por tanto, el número de átomos de cobre por cm^3 es:

$$n = \frac{4 \text{ átomos/celda}}{(3.6151 \times 10^{-8} \text{ cm})^3} = 8.466 \times 10^{22} \text{ átomos de cobre/cm}^3$$

A temperatura ambiente, $T = 25 + 273 = 298 \text{ K}$:

$$\begin{aligned} n_v &= n \exp\left(\frac{-Q_v}{RT}\right) \\ &= \left(8.466 \times 10^{22} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3}\right) \exp\left[\frac{-20\,000 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}}{\left(1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right)(298 \text{ K})}\right] \\ &= 1.814 \times 10^8 \text{ vacancias/cm}^3 \end{aligned}$$

Se desea encontrar una temperatura de tratamiento térmico que conduzca a una concentración de las vacancias que sea 1000 veces mayor que este número, o $n_v = 1.814 \times 10^{11}$ vacancias/ cm^3 .

Se puede hacer esto calentando el cobre a una temperatura a la cual se forme este número de vacancias:

$$\begin{aligned} n_v &= 1.814 \times 10^{11} = n \exp\left(\frac{-Q_v}{RT}\right) \\ &= (8.466 \times 10^{22}) \exp(-20\,000)/(1.987T) \\ \exp\left(\frac{-20\,000}{1.987T}\right) &= \frac{1.814 \times 10^{11}}{8.466 \times 10^{22}} = 0.214 \times 10^{-11} \\ \frac{-20\,000}{1.987T} &= \ln(0.214 \times 10^{-11}) = -26.87 \\ T &= \frac{20\,000}{(1.987)(26.87)} = 375 \text{ K} = 102^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Al calentar el cobre ligeramente arriba de 100°C , esperando hasta que se alcance el equilibrio y después enfriando rápidamente el cobre de regreso a temperatura ambiente, el número de vacancias atrapadas en la estructura puede ser 1000 veces mayor que el número de equilibrio de vacancias a temperatura ambiente. Por tanto, las concentraciones de las vacancias encontradas en los materiales con frecuencia están determinadas por factores termodinámicos y cinéticos.

Ejemplo 4-2**Concentraciones de las vacancias en el hierro**

Calcule la densidad teórica del hierro y después determine el número de las vacancias necesarias para que un cristal de hierro CCCu tenga una densidad de 7.874 g/cm^3 . El parámetro de red del hierro es de $2.866 \times 10^{-8} \text{ cm}$.

SOLUCIÓN

La densidad teórica esperada del hierro puede calcularse a partir del parámetro de red y la masa atómica. Dado que el hierro es CCCu, están presentes dos átomos de hierro en cada celda unitaria.

$$\rho = \frac{(2 \text{ átomos/celda})(55.847 \text{ g/mol})}{(2.866 \times 10^{-8} \text{ cm})^3(6.022 \times 10^{23} \text{ átomos/mol})} = 7.879 \text{ g/cm}^3$$

Este cálculo supone que no hay imperfecciones en el cristal. Se calcula el número de átomos de hierro y vacancias que estarían presentes en cada celda unitaria para una densidad de 7.874 g/cm^3 .

$$\rho = \frac{(X \text{ átomos/celda})(55.847 \text{ g/mol})}{(2.866 \times 10^{-8} \text{ cm})^3(6.022 \times 10^{23} \text{ átomos/mol})} = 7.874 \text{ g/cm}^3$$

$$X \text{ átomos/celda} = \frac{(7.874 \text{ g/cm}^3)(2.866 \times 10^{-8} \text{ cm})^3(6.022 \times 10^{23} \text{ átomos/mol})}{(55.847 \text{ g/mol})} = 1.99878$$

Debe haber $2.00 - 1.99878 = 0.00122$ vacancias por celda unitaria. El número de vacancias por cm^3 es

$$\text{Vacancias/cm}^3 = \frac{0.00122 \text{ vacancias/celda}}{(2.866 \times 10^{-8} \text{ cm})^3} = 5.18 \times 10^{19}$$

Observe que otros defectos como los límites de grano en un material policristalino contribuyen a una densidad menor que el valor teórico.

Defectos intersticiales Se forma un **defecto intersticial** cuando se inserta un átomo o ion adicional en la estructura cristalina en una posición por lo general desocupada, como en la figura 4-1b). En la tabla 3-6 se ilustraron los sitios intersticiales. Los átomos o iones intersticiales, aunque mucho menores que los átomos o iones localizados en los puntos de red, siguen siendo mayores que los sitios intersticiales que ocupan; en consecuencia, la región cristalina circundante está comprimida y distorsionada. Los átomos intersticiales como el hidrógeno se presentan con frecuencia como impurezas, mientras que los átomos de carbono se adicionan de manera intencional al hierro con el fin de producir acero. Para concentraciones pequeñas, los átomos de carbono ocupan sitios intersticiales en la estructura cristalina del hierro, introduciendo un esfuerzo en la región localizada del cristal en su alrededor. Como se puede observar, la introducción de átomos intersticiales es una manera importante de incrementar la resistencia de los materiales metálicos. A diferencia de las vacancias, una vez introducidos, el número de átomos o iones intersticiales en la estructura permanece casi constante, aun cuando se modifique la temperatura.

Ejemplo 4-3

Sitios para el carbono en el hierro

En el hierro CCCa, los átomos de carbono se localizan en los sitios *octaédricos*, los cuales ocurren en el centro de cada arista de la celda unitaria $(0, 0, 1/2)$ y en el centro de la celda unitaria $(1/2, 1/2, 1/2)$. En el hierro CCCu, los átomos de carbono entran en sitios *tetraédricos*, como $(0, 1/2, 1/4)$. El parámetro de red es de 0.3571 nm para el hierro CCCa y de 0.2866 nm para el hierro CCCu. Suponga que los átomos de carbono tienen un radio de 0.071 nm . a) ¿Esperaría una mayor distorsión del cristal por un átomo de carbono intersticial en el hierro CCCa o en el CCCu? b) ¿Cuál sería el porcentaje atómico del carbono en cada tipo de hierro si se llenaran todos los sitios intersticiales?

SOLUCIÓN

- a) Se puede calcular el tamaño del sitio intersticial en el hierro CCCu en la localización $(0, 1/2, 1/4)$ con la ayuda de la figura 4-2a). El radio R_{CCCu} del átomo de hierro es

$$R_{\text{CCCu}} = \frac{\sqrt{3}a_0}{4} = \frac{(\sqrt{3})(0.2866)}{4} = 0.1241 \text{ nm}$$

A partir de la figura 4-2a), se encuentra que:

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{2}a_0\right)^2 + \left(\frac{1}{4}a_0\right)^2 &= (r_{\text{intersticial}} + R_{\text{CCCu}})^2 \\ (r_{\text{intersticial}} + R_{\text{CCCu}})^2 &= 0.3125a_0^2 = (0.3125)(0.2866 \text{ nm})^2 = 0.02567 \\ r_{\text{intersticial}} &= \sqrt{0.02567} - 0.1241 = 0.0361 \text{ nm} \end{aligned}$$

Para el hierro CCCa, los sitios intersticiales como el $(0, 0, 1/2)$ se encuentran a lo largo de las direcciones $\langle 001 \rangle$. Por tanto, el radio del átomo de hierro y el radio del sitio intersticial son [figura 4-2b)]:

$$\begin{aligned} R_{\text{CCCa}} &= \frac{\sqrt{2}a_0}{4} = \frac{(\sqrt{2})(0.3571)}{4} = 0.1263 \text{ nm} \\ 2r_{\text{intersticial}} + 2R_{\text{CCCa}} &= a_0 \\ r_{\text{intersticial}} &= \frac{0.3571 - (2)(0.1263)}{2} = 0.0523 \text{ nm} \end{aligned}$$

El sitio intersticial en el hierro CCCu es menor que en el sitio intersticial en el hierro CCCa. Dado que ambos son menores que el átomo de carbono, el carbono distorsiona la estructura cristalina CCCu más que la cristalina CCCa. Como resultado, se espera que entren menos átomos de carbono en las posiciones intersticiales en el hierro CCCu que en las del hierro CCCa.

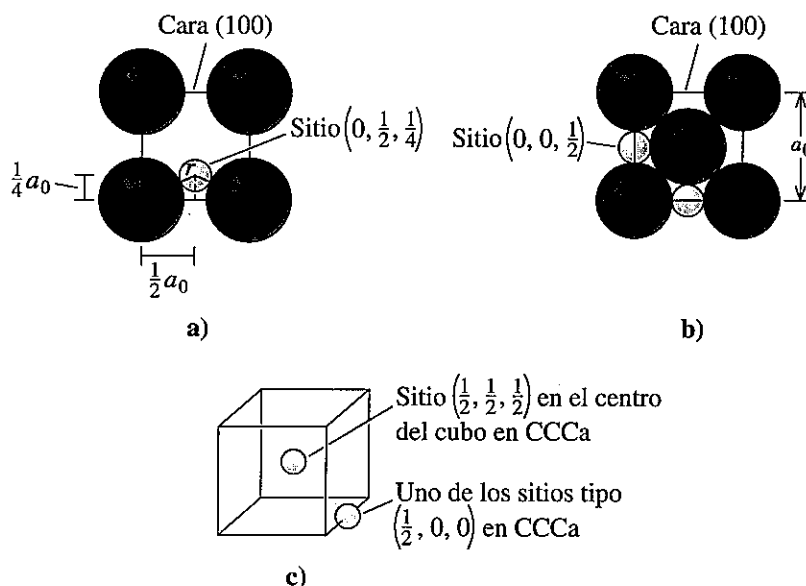


Figura 4-2 a) Localización del sitio intersticial $(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{4})$ en los metales CCCu. b) Sitio $(0, 0, \frac{1}{2})$ en los metales CCCa. c) Los centros de las aristas y los centros de los cubos son algunos de los sitios intersticiales en la estructura CCCa (para el ejemplo 4-3).

- b) En el hierro CCCu, se esperan dos átomos de hierro en cada celda unitaria. Se puede encontrar un total de 24 sitios intersticiales del tipo $(1/4, 1/2, 0)$; sin embargo, dado que cada sitio se localiza en una cara de la celda unitaria, sólo la mitad de cada sitio pertenece de manera única a una sola celda. Por tanto, hay

$$(24 \text{ sitios})\left(\frac{1}{2}\right) = 12 \text{ sitios intersticiales por celda unitaria}$$

Si se llenaran todos los sitios intersticiales, el porcentaje atómico del carbono contenido en el hierro sería

$$a \% C = \frac{12 \text{ átomos de C}}{12 \text{ átomos de C} + 2 \text{ átomos de Fe}} \times 100 = 86\%$$

En el hierro CCCa se esperan cuatro átomos de hierro en cada celda unitaria y el número de sitios intersticiales octaédricos es

$$(12 \text{ aristas})\left(\frac{1}{4}\right) + 1 \text{ centro} = 4 \text{ sitios intersticiales por celda unitaria [figura 4-2c]}$$

De nuevo, si se llenaran todos los sitios intersticiales octaédricos, el porcentaje atómico del carbono en el hierro CCCa sería

$$a \% C = \frac{4 \text{ átomos de C}}{4 \text{ átomos de C} + 4 \text{ átomos de Fe}} \times 100 = 50\%$$

Como se verá en un capítulo posterior, el porcentaje atómico máximo del carbono presente en las dos formas del hierro en condiciones de equilibrio es

CCCu: 1.0%

CCCa: 8.9%

Debido a la deformación impuesta sobre la estructura cristalina del hierro por los átomos intersticiales, particularmente en el hierro CCCu, la fracción de los sitios intersticiales que pueden ocuparse es bastante pequeña.

Defectos sustitucionales Se introduce un defecto sustitucional cuando se reemplaza un átomo o un ion por un tipo distinto de átomo o ion como en la figura 4-1c) y d). Los átomos o iones sustitucionales ocupan el sitio de red normal. Los átomos o iones sustitucionales pueden ser mayores que los átomos o iones normales en la estructura cristalina, en este caso se reducen los espaciados interatómicos circundantes, o menores, ocasionando que los átomos circundantes tengan espaciados interatómicos mayores. En cualquier caso, los defectos sustitucionales alteran al cristal circundante. De nuevo, el defecto sustitucional puede introducirse como una impureza o como una adición de aleación de manera deliberada y, una vez introducidos, el número de defectos es relativamente independiente de la temperatura.

Los ejemplos de defectos sustitucionales incluyen la incorporación de dopantes como el fósforo (P) o el boro (B) en el Si. De manera similar, si se adicionara cobre al níquel, los átomos de cobre ocuparían los sitios cristalográficos donde los átomos de níquel estarían presentes por lo general. Los átomos sustitucionales con frecuencia aumentarán la resistencia del material metálico. Los defectos sustitucionales también aparecen en los materiales cerámicos. Por ejemplo, si se adicionara MgO al NiO, los iones Mg^{+2} ocuparían los sitios Ni^{+2} y los iones O^{-2} del MgO ocuparían los sitios O^{-2} del NiO. Que los átomos o iones entren en los sitios intersticiales o sustitucionales depende del tamaño y la valencia de estos átomos o iones huéspedes en comparación con el tamaño y la valencia de los iones anfitriones. Como se explicó en el capítulo 3, sección 6, el tamaño de los sitios disponibles también desempeña una función en esto.

4-2 Otros defectos puntuales

Se crea una **intersticialidad** cuando un átomo idéntico a aquellos en los puntos de red normales se localiza en una posición intersticial. Estos defectos son más probables de encontrarse en las estructuras cristalinas que tienen un factor de empaquetamiento bajo.

Un **defecto de Frenkel** es un par de vacancia-intersticial formado cuando un ion salta de un punto de red normal a un sitio intersticial, como en la figura 4-1e), dejando atrás una vacancia. Aunque por lo general se asocia con los materiales iónicos, un defecto de Frenkel puede ocurrir en metales y en materiales enlazados de manera covalente. Un **defecto de Schottky**, figura 4-1f), es único para los materiales iónicos y se encuentra de manera común en muchos materiales cerámicos. Cuando las vacancias ocurren en un material enlazado de manera iónica, debe estar ausente un número estequiométrico de aniones y cationes de las posiciones atómicas regulares para que se conserve la neutralidad eléctrica. Por ejemplo, una vacancia de Mg^{+2} y una vacancia de O^{-2} en el MgO constituyen un par de Schottky. En la ZrO_2 , por una vacancia de Zr^{+4} , habrá dos vacancias de O^{-2} .

Un defecto puntual sustitucional importante ocurre cuando un ion de una carga reemplaza un ion de una carga diferente. Esto podría ser el caso cuando un ion con una valencia de +2 reemplaza un ion con una valencia de +1 (figura 4-3). En este caso, se introduce en la estructura una carga positiva adicional. Para mantener un balance de las cargas, podría crearse una vacancia donde por lo regular se localizaría un catión +1. De nuevo, esta imperfección se observa en los materiales que tienen un pronunciado enlace iónico.

Por tanto, en los sólidos iónicos, cuando se introducen defectos puntuales, tienen que observarse las siguientes reglas:

- a) debe conservarse un balance de la carga de tal manera que el material cristalino como un todo sea eléctricamente neutro;
- b) debe conservarse un balance de la masa, y
- c) debe conservarse el número de sitios cristalográficos.

Por ejemplo, en el óxido de níquel (NiO) si falta un ion oxígeno, se crea una vacancia de ion oxígeno (designada como $\text{V}_{\text{O}}^{\cdot\cdot}$). Cada punto ($\cdot$) en el superíndice indica una carga *efectiva* positiva de uno. Para conservar la estequiometría, el balance de la masa y el balance de la carga, también se debe crear una vacancia de ion níquel (designada como V_{Ni}''). Cada acento ($'$) en el superíndice indica una carga *efectiva* de -1.

Se utiliza la **notación de Kröger-Vink** para escribir las ecuaciones químicas de los defectos. La letra principal en esta notación describe una vacancia o el nombre del elemento. El superíndice indica la carga efectiva en el defecto y el subíndice describe la localización del defecto. Un punto ($\cdot$) indica una carga efectiva de +1 y un acento ($'$) representa una carga efectiva de -1. En ocasiones se utiliza x para indicar que no hay carga neta. Cualquier electrón libre u orificio se indica como e y h , respectivamente. (En el capítulo 19 se explicarán los orificios.) Las concentraciones de los defectos que tienen asociación se muestran entre paréntesis. Los defectos asociados, los cuales pueden afectar el transporte de la masa en los materiales,

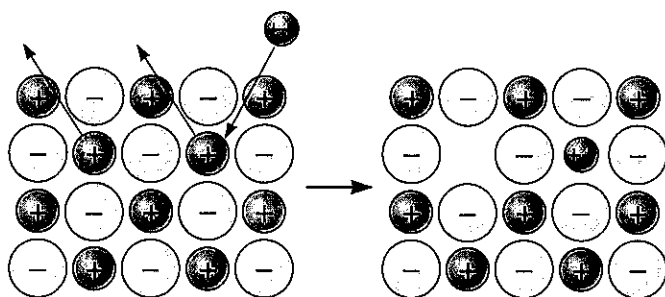


Figura 4-3

Cuando un catión divalente reemplaza un catión monovalente, también debe eliminarse un segundo catión monovalente, lo que crea una vacancia.

en ocasiones son neutros y difíciles de detectar de manera experimental. Las concentraciones de los defectos se muestran entre corchetes.

Los siguientes ejemplos ilustran el uso de la notación de Kröger-Vink para la escritura de las **reacciones químicas de los defectos**. En ocasiones, es posible escribir múltiples reacciones químicas de los defectos válidas para describir la posible química del defecto. En tales casos, es necesario tomar en cuenta la energía que se necesita para crear los distintos defectos y es necesaria una verificación experimental. Esta notación es útil en la descripción de la química de los defectos en los semiconductores y muchos materiales cerámicos como sensores, dieléctricos y otras aplicaciones.

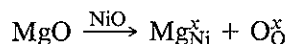
Ejemplo 4-4

Aplicación de la notación de Kröger-Vink

Escriba las reacciones apropiadas de los defectos para a) la incorporación de óxido de magnesio (MgO) en óxido de níquel (NiO) y b) la formación de un defecto de Schottky en la alúmina (Al_2O_3).

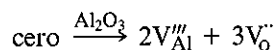
SOLUCIÓN

- a) El MgO es el huésped y el NiO es el material anfitrión. Se supondrá que los iones Mg^{+2} ocuparán los sitios Ni^{+2} y los aniones oxígeno del MgO ocuparán los sitios O^{-2} del NiO.



Se necesita asegurar que la ecuación tiene carga, masa y balance de los sitios. En el lado izquierdo, se tiene un Mg, un oxígeno y ninguna carga neta. Lo mismo es verdadero en el lado derecho. El balance de los sitios puede ser un poco complicado, un Mg^{+2} ocupa un sitio Ni^{+2} . Dado que se está introduciendo MgO en NiO, se utiliza un sitio Ni^{+2} y, por tanto, se debe utilizar un sitio O^{-2} . Se puede observar que esto es cierto examinando el lado derecho de esta ecuación.

- b) Un defecto de Schottky en la alúmina involucrará dos iones aluminio y tres iones oxígeno. Cuando hay una vacancia en un sitio de aluminio, falta una carga de +3 y el sitio tiene una carga efectiva de -3. Por tanto V_{Al}''' describe una vacancia del Al^{+3} . De manera similar, $\text{V}_{\text{O}}^{\bullet\bullet}$ representa una vacancia del ion oxígeno. Para el balance de los sitios en la alúmina, se necesita asegurar que por cada dos sitios del ion aluminio utilizados, se utilizan tres sitios del ion oxígeno. Dado que se tienen vacancias, la masa en el lado derecho es cero y por eso se escribe el lado izquierdo igual a cero. Por tanto, la reacción del defecto será



Ejemplo 4-5

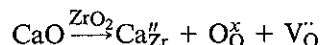
Defectos puntuales en la zirconia estabilizada para óxidos sólidos

Escriba las reacciones apropiadas de los defectos para la incorporación de óxido de calcio (CaO) en zirconia (ZrO_2) utilizando la notación de Kröger-Vink.

SOLUCIÓN

Se supondrá que el Ca^{+2} ocupará sitios Zr^{+4} . Si se envía un Ca^{+2} al Zr^{+4} , el sitio tendrá una carga efectiva de -2 (en vez de tener una carga de +4, se tiene una carga de +2). Se ha utilizado un sitio Zr^{+4} y el balance de los sitios requiere *dos sitios del oxígeno*. Se puede enviar un O^{-2} de CaO a uno de los sitios O^{-2} en la ZrO_2 . Debe utilizarse otro sitio del

oxígeno y dado que el balance de las masas también debe conservarse, se tendrá que mantener este sitio vacante (es decir, tendrá que crearse una vacancia de ion oxígeno).



La concentración de las vacancias del oxígeno en la ZrO_2 (es decir, $[\text{V}_{\text{O}}^{\bullet}]$) incrementará con el aumento de la concentración de CaO . Estas vacancias del ion oxígeno hacen a la ZrO_2 estabilizada con CaO un conductor iónico. Esto permite el uso de este tipo de ZrO_2 en los sensores de oxígeno utilizados en los automóviles y las celdas de combustible de óxido sólido.

4-3 Dislocaciones

Las **dislocaciones** son imperfecciones lineales en un cristal que de otra manera sería perfecto. Por lo regular se introducen en el cristal durante la solidificación del material o cuando se deforma de manera permanente el material. Aunque las dislocaciones están presentes en todos los materiales, incluyendo las cerámicas y los polímeros, *son particularmente útiles para explicar la deformación y el endurecimiento en los materiales metálicos*. Se pueden identificar tres tipos de dislocaciones: la dislocación helicoidal, la dislocación de arista y la dislocación mixta.

Dislocaciones helicoidales La dislocación helicoidal (figura 4-4) puede ilustrarse cortando de manera parcial a través de un cristal perfecto y después torciendo el cristal en un espaciado atómico. Si se sigue un plano cristalográfico una revolución alrededor del eje sobre el cual se torció el cristal, comenzando en el punto x y recorriendo espaciados atómicos iguales en cada dirección, se termina en el punto y un espaciado atómico debajo del punto inicial. Si no estuviera presente una dislocación helicoidal, la vuelta se cerraría. El vector requerido para completar la vuelta es el **vector de Burgers b** . Si se continúa la rotación, se trazaría una trayectoria espiral. El eje, o línea alrededor de la cual se traza esta trayectoria, es la dislocación helicoidal. El vector de Burgers es paralelo a la dislocación helicoidal.

Dislocaciones de arista Una dislocación de arista (figura 4-5) puede ilustrarse cortando de manera parcial a través de un cristal perfecto, separando el cristal, y llenando de manera parcial el corte con un medio plano adicional de átomos. La arista inferior

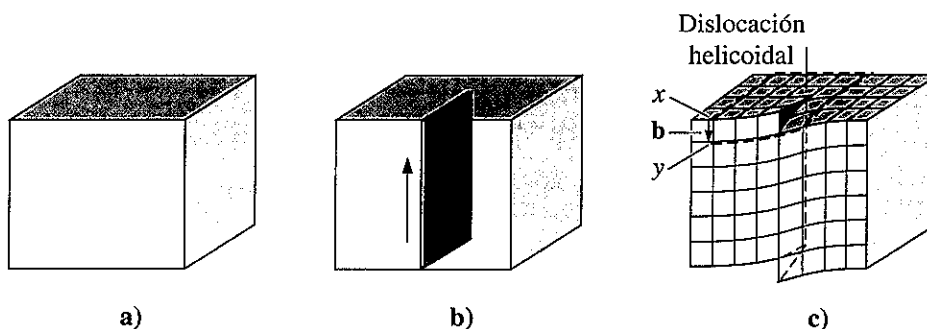


Figura 4-4 El cristal perfecto a) es cortado y ranura un espaciado atómico, b) y c). La línea a lo largo de la cual ocurre el corte es la dislocación helicoidal. Se requiere un vector de Burgers b para completar una vuelta de espaciados atómicos iguales alrededor de la dislocación helicoidal.

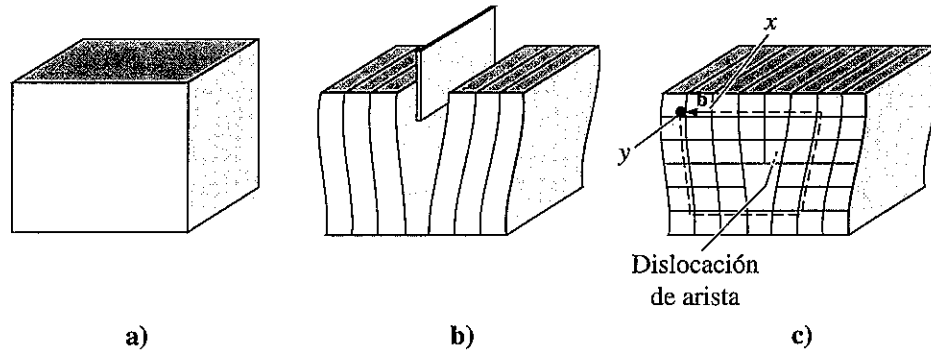


Figura 4-5 El cristal perfecto en a) es cortado y se inserta un medio plano adicional de átomos b). La arista inferior del medio plano adicional es una dislocación de arista c). Se requiere un vector de Burgers b para completar una vuelta de espaciados atómicos iguales alrededor de la dislocación de arista. (Adaptado de J. D. Verhoeven, *Fundamentals of Physical Metallurgy*, Wiley, 1975.)

de este plano insertado representa la dislocación de arista. Si se describe una vuelta en sentido de las manecillas del reloj alrededor de la dislocación de arista, comenzando en el punto x y recorriendo un número igual de espaciados atómicos en cada dirección, se termina en el punto y a un espaciado atómico del punto inicial. Si no estuviera presente la dislocación de arista, la vuelta se cerraría. El vector requerido para completar la vuelta es, de nuevo, el vector de Burgers. En este caso, el vector de Burgers es perpendicular a la dislocación. Al introducir la dislocación, los átomos sobre la línea de la dislocación se comprimen de manera estrecha, mientras que los átomos debajo de la dislocación se estiran demasiado. La región circundante del cristal ha sido perturbada por la presencia de la dislocación. [Esto se ilustra posteriormente en la figura 4-8b).] Con frecuencia se utiliza el símbolo " $\perp$ " para indicar una dislocación de arista. El eje largo de los puntos " $\perp$ " apunta hacia el medio plano adicional. A diferencia de una dislocación de arista, una dislocación helicoidal no puede visualizarse como un medio plano adicional de átomos.

Dislocaciones mixtas Como se muestra en la figura 4-6, las **dislocaciones mixtas** tienen componentes de arista y helicoidal, con una región de transición entre ellas. Sin embargo, el vector de Burgers sigue siendo el mismo para todas las porciones de la dislocación mixta.

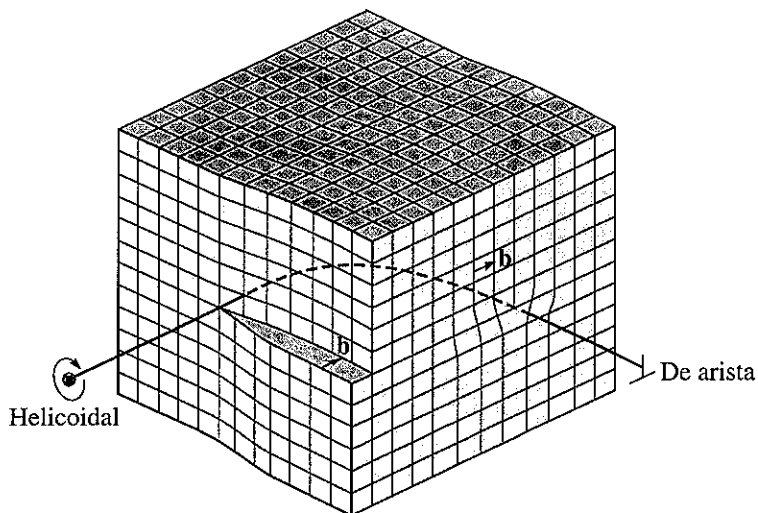


Figura 4-6
Dislocación mixta. La dislocación helicoidal en la cara frontal del cristal cambia de manera gradual a la dislocación de arista en el lado del cristal. (Adaptada de W. T. Read, *Dislocations in Crystals*. McGraw-Hill, 1953.)

Esfuerzos Cuando se explica el movimiento de las dislocaciones, es necesario referirse al concepto de esfuerzo, el cual se cubrirá a detalle en el capítulo 6. Por ahora, es suficiente decir que el esfuerzo es la fuerza por unidad de área. El esfuerzo tiene unidades de lb/pulg² conocidas como psi (libras por pulgada cuadrada) o N/m² conocidas como pascal (Pa). Se origina un esfuerzo normal cuando la fuerza aplicada actúa perpendicular al área de interés. Se origina un esfuerzo cortante τ cuando la fuerza actúa en una dirección paralela al área de interés.

Movimiento de la dislocación Considere la dislocación de arista mostrada en la figura 4-7a). A un plano que contiene la línea de dislocación y al vector de Burgers se le conoce como **plano del deslizamiento**. Cuando se aplica un esfuerzo cortante lo suficientemente grande actuando paralelo al vector de Burgers a un cristal que contiene una dislocación, ésta puede moverse a través de un proceso conocido como **deslizamiento**. Los enlaces que atraviesan el plano del deslizamiento entre los átomos en la columna a la derecha de la dislocación se muestran como rotos. Los átomos en la columna a la derecha de la dislocación debajo del plano del deslizamiento se desplazan ligeramente por lo que establecen enlaces con los átomos de la dislocación de arista. De esta manera, la dislocación se ha desplazado a la derecha [figura 4-7b)]. Si el proceso continúa, la dislocación se mueve a través del cristal [figura 4-7c)] hasta que produce un escalón en el exterior del cristal [figura 4-7d)] en la **dirección del deslizamiento** (la cual es paralela al vector de Burgers). (Observe que la combinación de un plano de deslizamiento y una dirección del deslizamiento comprende un **sistema de desliza-**

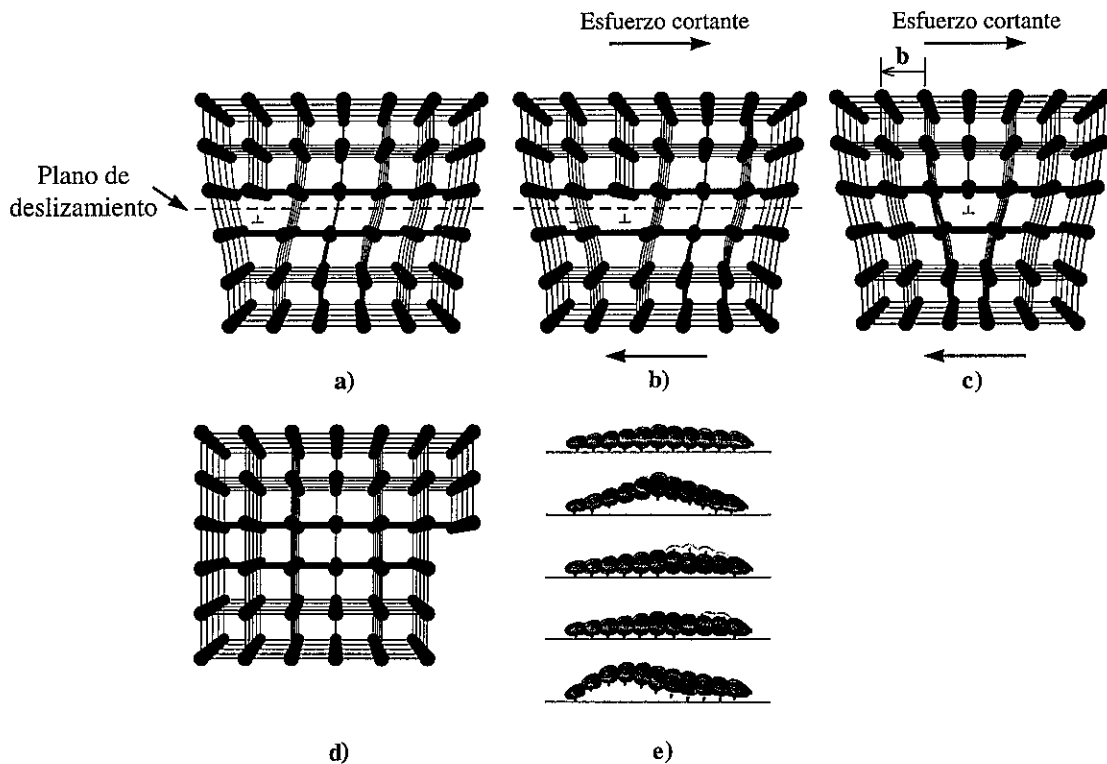


Figura 4-7 a) Cuando se aplica un esfuerzo cortante a la dislocación en a), los átomos se desplazan, b) ocasionando que la dislocación se mueva un vector de Burgers en la dirección de deslizamiento. c) El movimiento continuo de la dislocación con el tiempo crea un escalón d) y el cristal se deforma. (Adaptado de A. G. Guy, *Essentials of Materials Science*, McGraw-Hill, 1976.) e) El movimiento de una oruga es análogo al movimiento de una dislocación.

miento.) La mitad superior del cristal ha sido desplazada un vector de Burgers con relación a la mitad inferior; el cristal se ha deformado de manera plástica (o permanente). Este es el proceso fundamental que ocurre muchas veces a medida que dobla un clip de papel con sus dedos. La deformación plástica de los metales es principalmente el resultado de la propagación de las dislocaciones.

Este proceso de rompimiento y reformación de enlaces de manera progresiva requiere mucho menos energía que la que se requeriría para romper de manera instantánea todos los enlaces que atraviesan el plano del deslizamiento. El cristal se deforma por medio de la propagación de las dislocaciones debido a que es un proceso energéticamente favorable. Considere el movimiento por medio del cual se mueve una oruga [figura 4-7e)]. Una oruga sólo levanta algunas de sus patas en algún momento dado y utilizará ese movimiento para moverse de un lugar a otro en lugar de levantar todas las patas a la vez para moverse hacia adelante. ¿Por qué? Debido a que levantar sólo algunas de sus patas requiere menos energía es más fácil para la oruga hacer esto. Otra manera de visualizar esto es pensar acerca de cómo podrá mover una alfombra grande que está colocada de manera incorrecta en una habitación. Si desea reposicionar la alfombra, en vez de levantarla del piso y moverla toda a la vez, podría formar un plegado en la alfombra y empujar el plegado en la dirección en la que desea mover la alfombra. El ancho del plegado es análogo al vector de Burgers. De nuevo, usted moverá la alfombra de esta manera debido a que se requiere menos energía; es más fácil.

Deslizamiento La figura 4-8a) es un diagrama esquemático de una dislocación de arista que está sujeta a un esfuerzo cortante τ que actúa en forma paralela al vector de Burgers y de manera perpendicular a la línea de dislocación. En este dibujo, la dislocación de arista se está propagando en una dirección opuesta a la dirección de la propagación mostrada en la figura 4-7a). Una componente del esfuerzo cortante debe actuar en forma paralela al vector de Burgers para que la dislocación se mueva. La línea de dislocación se mueve en una dirección paralela al vector de Burgers. La figura 4-8b) muestra una dislocación helicoidal. Para una dislocación helicoidal, una componente del esfuerzo cortante debe actuar en forma paralela al vector de Burgers (y por tanto a la línea de dislocación) para que la dislocación se mueva. La dislocación se mueve en una dirección perpendicular al vector de Burgers y el escalón del deslizamiento que se produce es paralelo al vector de Burgers. Dado que el vector de Burgers de una dislocación helicoidal es paralelo a la línea de la dislocación, la especificación del vector de Burgers y la línea de la dislocación no definen un plano del deslizamiento para una dislocación helicoidal.

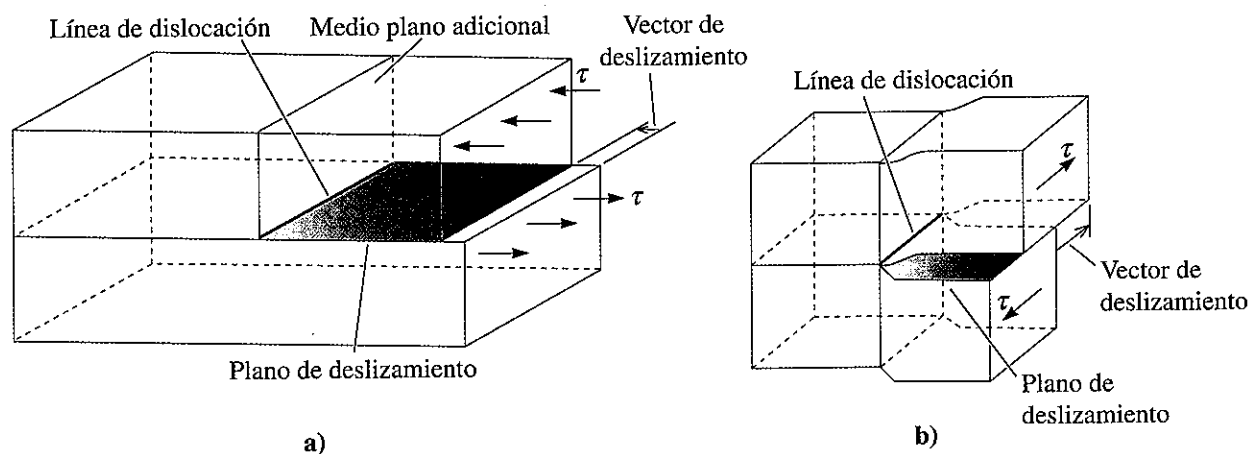


Figura 4-8 Esquema de la línea de dislocación, del plano de deslizamiento y del vector de deslizamiento (Burgers) para a) una dislocación de arista y b) una dislocación helicoidal. (Adaptado de J. D. Verhoeven, *Fundamentals of Physical Metallurgy*, Wiley, 1975.)

Durante el deslizamiento, una dislocación se mueve de un conjunto de entornos a un conjunto de entornos idéntico. Se requiere el **esfuerzo de Peierls-Nabarro** (ecuación 4-2) para mover la dislocación de una localización de equilibrio a otra.

$$\tau = c \exp(-kdb) \quad (4-2)$$

donde τ es el esfuerzo cortante requerido para mover la dislocación, d es el espaciado interplanar entre los planos del deslizamiento adyacentes, b es la magnitud del vector de Burgers y c y k son constantes para el material. La dislocación se mueve en un sistema de deslizamiento que requiere el gasto de energía mínimo. Varios factores importantes determinan los sistemas de deslizamiento más probables de ser activos:

1. El esfuerzo requerido para ocasionar que la dislocación se mueva aumenta de manera exponencial con la longitud del vector de Burgers. Por tanto, la dirección de deslizamiento debe tener una distancia repetitiva pequeña o una densidad lineal alta. Las direcciones compactas en los metales y aleaciones cumplen este criterio y son las direcciones de deslizamiento comunes.
2. El esfuerzo requerido para ocasionar que la dislocación se mueva disminuye de manera exponencial con el espaciado interplanar de los planos del deslizamiento. El deslizamiento se lleva a cabo de manera más fácil entre los planos de átomos que son llanos (por lo que hay "colinas o valles" más pequeños sobre la superficie) y entre los planos que están muy alejados (o tienen un espaciado interplanar relativamente grande). Los planos con una densidad planar alta cumplen este requerimiento. Por tanto, los planos de deslizamiento por lo regular son planos compactos o lo más compactos posibles. En la tabla 4-1 se resumen los sistemas de deslizamiento comunes en varios materiales.
3. Las dislocaciones no se mueven con facilidad en materiales como el silicio, los cuales tienen enlaces covalentes. Debido a la fuerza y direccionalidad de los enlaces, los materiales por lo regular fallan de una manera quebradiza antes de que la fuerza sea lo suficientemente alta para ocasionar un deslizamiento apreciable. Las dislocaciones también desempeñan una función relativamente menor en la deformación de los polímeros. La mayoría de los polímeros contienen una fracción de volumen sustancial del material que es amorfo y, por tanto, no contienen dislocaciones. La deformación permanente en los polímeros involucra sobre todo el estiramiento, la rotación y el desenredado de las moléculas de cadena larga.
4. Los materiales con enlace iónico, incluyendo muchas cerámicas como el MgO, también son resistentes al deslizamiento. El movimiento de una dislocación afecta el balance de la carga alrededor de los aniones y cationes, requiriendo que se rompan los enlaces entre los aniones y cationes. Durante el deslizamiento, los iones con carga similar también

TABLA 4-1 ■ Planos y direcciones de deslizamiento en estructuras metálicas

Estructura cristalina	Plano de deslizamiento	Dirección de deslizamiento
Metales CCCu	{110}	$\langle 111 \rangle$
	{112}	
	{123}	
Metales CCCa	{111}	$\langle 110 \rangle$
Metales CH	{0001}	$\langle 100 \rangle$
	{11 $\bar{2}$ 0}	$\langle 110 \rangle$
	{10 $\bar{1}$ 0}	o $\langle 10\bar{2}0 \rangle$
	{10 $\bar{1}$ 1}	
MgO, NaCl (iónico)	{110}	$\langle 110 \rangle$
Silicio (covalente)	{111}	$\langle 110 \rangle$

Nota: Estos planos son activos en algunos metales y aleaciones o a temperaturas elevadas.

deben pasar cerca unos de otros, lo que ocasiona repulsión. Por último, la distancia repetitiva a lo largo de la dirección de deslizamiento, o del vector de Burgers, es mayor que en los metales y aleaciones. De nuevo, la falla quebradiza de los materiales cerámicos ocurre por lo general debido a la presencia de desperfectos tales como poros pequeños antes de que el nivel del esfuerzo aplicado sea el suficiente para ocasionar que las dislocaciones se muevan. La ductilidad en las cerámicas puede obtenerse por medio de

- a) transformaciones de fase (conocidas como plasticidad de transformación, un ejemplo es la zirconia estabilizada por completo);
- b) el maclado mecánico;
- c) movimiento de la dislocación, y
- d) deslizamiento de los límites de granos.

En este capítulo se explicarán algunos de estos conceptos. Por lo general, las temperaturas más altas y los esfuerzos de compresión conducen a una ductilidad mayor. Recientemente, se ha demostrado que ciertas cerámicas como el titanato de estroncio (SrTiO_3) pueden exhibir una ductilidad considerable. En ciertas condiciones, las cerámicas pueden mostrar deformaciones muy grandes. A esto se le conoce como comportamiento superplástico.

Ejemplo 4-6

En la figura 4-9 se muestra la representación de una dislocación en el óxido de magnesio (MgO), el cual tiene la estructura cristalina del cloruro de sodio y un parámetro de red de 0.396 nm. Determine la longitud del vector de Burgers.

SOLUCIÓN

En la figura 4-9 comience una vuelta en dirección de las manecillas del reloj alrededor de la dislocación en el punto x y después mueva espaciados atómicos iguales en las dos direcciones horizontales y espaciados atómicos iguales en las dos direcciones verticales para finalizar en el punto y . Observe que es necesario que las longitudes de los dos segmentos horizontales de la vuelta sean iguales y que las longitudes de los segmentos verticales sean iguales, pero que no es necesario que los segmentos horizontales y verticales sean iguales en longitud entre sí. La vuelta elegida debe cerrarse en un cristal perfecto.

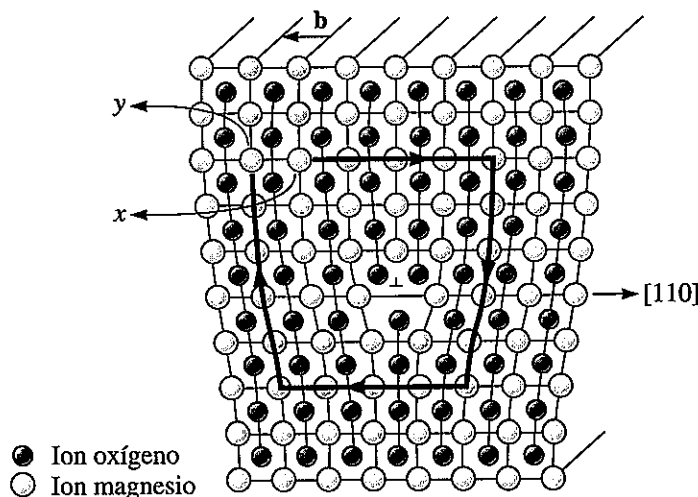


Figura 4-9
Una dislocación de arista en el MgO que muestra la dirección de deslizamiento y el vector de Burgers (para el ejemplo 4-6). (Adaptado de W. D. Kingery, H. K. Bowen y D. R. Uhlmann, *Introduction to Ceramics*, John Wiley, 1976.)

El vector $\mathbf{b}$ es el vector de Burgers. Debido a que $\mathbf{b}$ es paralelo a una dirección $[110]$, debe ser perpendicular a los planos (110) . La longitud de $\mathbf{b}$ es la distancia entre dos planos (110) adyacentes. A partir de la ecuación 3-7,

$$d_{110} = \frac{a_0}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} = \frac{0.396}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 0^2}} = 0.280 \text{ nm}$$

El vector de Burgers es una dirección (110) que es de 0.280 nm de longitud. Sin embargo, observe que dos medios planos adicionales de átomos constituyen la dislocación, un compuesto de iones oxígeno y otro de iones magnesio (figura 4-9). Esta fórmula para el cálculo de la magnitud del vector de Burgers no funcionará para sistemas no cúbicos. Es mejor considerar la magnitud del vector de Burgers como igual a la distancia repetitiva en la dirección de deslizamiento.

Ejemplo 4-7

Cálculo del vector de Burgers

Calcule la longitud del vector de Burgers en el cobre.

SOLUCIÓN

El cobre tiene una estructura cristalina CCCa. El parámetro de red del cobre (Cu) es de 0.36151 nm. Las direcciones compactas, o las direcciones del vector de Burgers, son de la forma $\langle 110 \rangle$. La distancia repetitiva a lo largo de las direcciones $\langle 110 \rangle$ es de un medio la diagonal de la cara, dado que los puntos de red se localizan en las esquinas y en los centros de las caras [figura 4-10a].

$$\text{Diagonal de la cara} = \sqrt{2}a_0 = (\sqrt{2})(0.36151) = 0.51125 \text{ nm}$$

La longitud del vector de Burgers, o distancia repetitiva, es:

$$\mathbf{b} = \frac{1}{2}(0.51125)\text{nm} = 0.25563 \text{ nm}$$

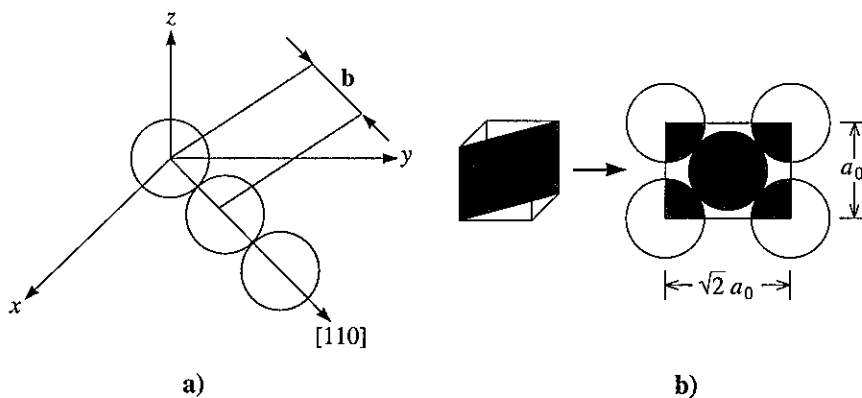


Figura 4-10 a) Vector de Burgers para el cobre CCCa. b) Localizaciones de los átomos en un plano (110) en una celda unitaria CCCu (para los ejemplos 4-7 y 4-8, respectivamente).

Ejemplo 4-8

La densidad planar del plano (112) en el hierro CCCu es 9.94×10^{14} átomos/cm². Calcule a) la densidad planar del plano (110) y b) los espaciados interplanares para los planos (112) y (110). ¿En cuál plano ocurriría por lo general un deslizamiento?

SOLUCIÓN

El parámetro de red del hierro CCCu es de 0.2866 nm o 2.866×10^{-8} cm. En la figura 4-10b) se muestra el plano (110) con la porción de átomos que se encuentran dentro de la celda unitaria sombreada. Observe que un cuarto de los cuatro átomos en las esquinas más el átomo en el centro se encuentran dentro de un área de a_0 por $\sqrt{2}a_0$.

a) La densidad planar es:

$$\begin{aligned}\text{Densidad planar (110)} &= \frac{\text{átomos}}{\text{área}} = \frac{2}{(\sqrt{2})(2.866 \times 10^{-8} \text{ cm})^2} \\ &= 1.72 \times 10^{15} \text{ átomos/cm}^2\end{aligned}$$

$$\text{Densidad planar (112)} = 0.994 \times 10^{15} \text{ átomos/cm}^2 \text{ (del enunciado del problema)}$$

b) Los espaciados interplanares son:

$$\begin{aligned}d_{110} &= \frac{2.866 \times 10^{-8}}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 0}} = 2.0266 \times 10^{-8} \text{ cm} \\ d_{112} &= \frac{2.866 \times 10^{-8}}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 2^2}} = 1.17 \times 10^{-8} \text{ cm}\end{aligned}$$

La densidad planar y el espaciado interplanar del plano (110) son mayores que los del plano (112); por tanto, el plano (110) es el plano de deslizamiento preferente.

Cuando se realiza un “ataque químico” sobre un material metálico (un tratamiento por reacción química que involucra la exposición a un ácido o una base), las áreas donde las dislocaciones intersecan la superficie del cristal reaccionan con mayor rapidez que el material circundante. Estas regiones aparecen en la microestructura como **poros de ataque químico**. La figura 4-11 muestra la distribución de los poros de ataque químico sobre una superficie de un cristal de carburo de silicio (SiC). Se utiliza un **microscopio electrónico de transmisión** (MET) para observar las dislocaciones. En una imagen del MET común, las dislocaciones aparecen como líneas oscuras a magnificaciones muy altas como se muestra en la figura 4-12a).

Cuando miles de dislocaciones se mueven en el mismo plano producen un escalón grande en la superficie del cristal. A éste se le conoce como **línea de deslizamiento** [figura 4-12b)]. A un grupo de líneas de deslizamiento se les conoce como **banda de deslizamiento**.

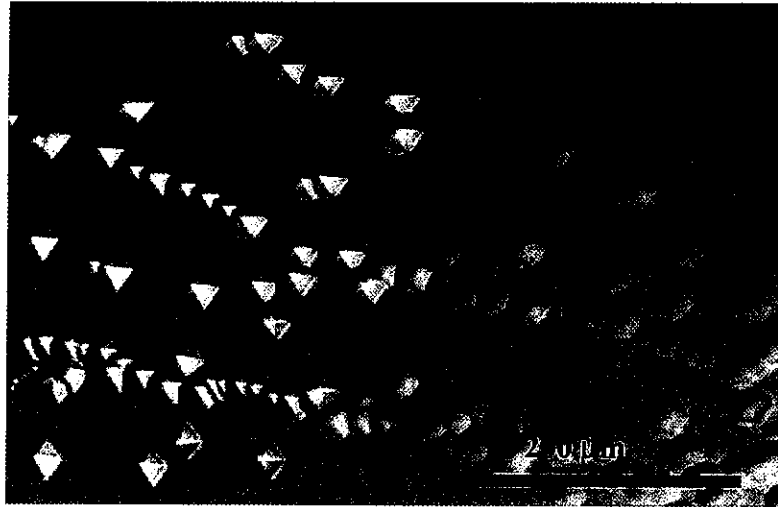


Figura 4-11 Imagen óptica de los poros de ataque químico en el carburo de silicio (SiC). Los poros de ataque químico corresponden a los puntos de intersección de las dislocaciones de arista con el vector de Burgers $\frac{a}{3} \langle 1\bar{1}20 \rangle$ y la línea de dislocación a lo largo de $[0001]$ (perpendicular a la superficie sobre la que se realiza el ataque químico). Las líneas de los poros de ataque químico representan límites de granos de ángulo pequeño. (Cortesía del Dr. Marek Skowronski, Carnegie Mellon University.)

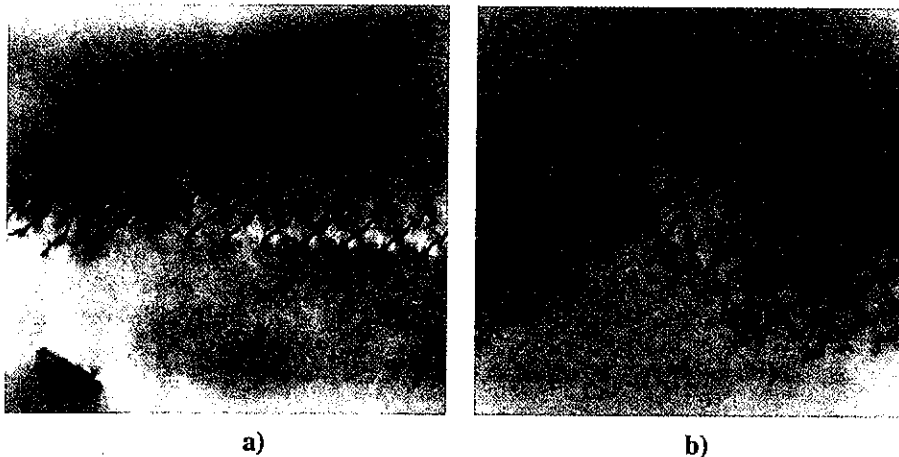


Figura 4-12 Micrografías electrónicas de las dislocaciones en el Ti_3Al : a) Apilamientos de las dislocaciones ($\times 36\,500$). b) Micrografía a $100\times$ que muestra las líneas del deslizamiento en el Al. (Reimpresión cortesía de Don Askeland.)

4-4 Importancia de las dislocaciones

Primero, las dislocaciones son de mayor importancia en los metales y aleaciones dado que proveen un mecanismo para la deformación plástica, la cual es el efecto acumulativo del deslizamiento de numerosas dislocaciones. La **deformación plástica** se refiere a la deformación o cambio irreversible de la forma en que se lleva a cabo cuando se elimina la fuerza o el esfuerzo que la ocasionó. Es decir, debido a que el esfuerzo aplicado ocasiona el movimiento de las dislocaciones que a su vez ocasiona una deformación permanente. Sin embargo, existen otros mecanismos que ocasionan una deformación permanente. En capítulos posteriores se examinarán

éstos. Debe distinguirse la deformación plástica de la **deformación elástica**, la cual es un cambio temporal de la forma que ocurre cuando se sigue aplicando una fuerza o un esfuerzo a un material. En la deformación elástica el cambio de forma es resultado del estiramiento de los enlaces interatómicos y no se lleva a cabo ningún movimiento de las dislocaciones. El deslizamiento puede ocurrir en algunas cerámicas y polímeros; sin embargo, otros factores (por ejemplo, la porosidad en las cerámicas, el desenredado de las cadenas en los polímeros, etc.) dominan el comportamiento mecánico casi a temperatura ambiente de los polímeros y cerámicas. Los materiales amorfos como los vidrios de silicato no poseen un arreglo periódico de iones y por tanto no contienen dislocaciones. *Por tanto, el proceso del deslizamiento es particularmente importante en la comprensión del comportamiento mecánico de los metales.* Primero, el deslizamiento explica por qué la resistencia de los metales es mucho menor que el valor pronosticado a partir del enlace metálico. Si ocurre el deslizamiento, sólo se necesita romper una pequeña fracción de todos los enlaces metálicos que atraviesan la interfaz en cualquier momento y la fuerza requerida para deformar el metal es pequeña. Puede demostrarse que la resistencia real de los metales es de 10^3 a 10^4 veces *menor* que la esperada a partir de la fuerza de los enlaces metálicos.

Segundo, el deslizamiento provee ductilidad en los metales. Si no se presentaran dislocaciones, una barra de hierro sería quebradiza y el metal no podría moldearse por medio de procesos de metalistería, tales como la forja, en formas útiles.

Tercero, las propiedades mecánicas de un metal o una aleación se controlan interfiriendo el movimiento de las dislocaciones. La introducción de un obstáculo en el cristal previene que una dislocación se deslice a menos que se apliquen fuerzas mayores. Por tanto, la presencia de dislocaciones ayuda a endurecer los materiales metálicos.

En los materiales se encuentran cantidades enormes de dislocaciones. La **densidad de las dislocaciones**, o longitud total de dislocaciones por unidad de volumen, se utiliza por lo general para representar la cantidad de dislocaciones presentes. Las densidades de las dislocaciones de 10^6 cm/cm³ son comunes de los metales más blandos, mientras que pueden alcanzarse densidades de hasta 10^{12} cm/cm³ deformando el material.

Las dislocaciones también influyen en las propiedades electrónicas y ópticas de los materiales. Por ejemplo, la resistencia del cobre puro aumenta con el incremento de la densidad de las dislocaciones. Anteriormente se mencionó que la resistividad del cobre puro también depende en gran medida de los niveles pequeños de impurezas. De manera similar, se prefiere el uso de cristales de silicio que sean en esencia libres de dislocaciones dado que esto permite que los portadores de la carga como los electrones se muevan de manera más libres a lo largo del sólido. Por lo general, la presencia de dislocaciones tiene un efecto perjudicial sobre el desempeño de los fotodetectores, diodos emisores de luz, láseres y celdas solares. Estos dispositivos con frecuencia se fabrican a partir de semiconductores compuestos como el arseniuro de galio-arseniuro de aluminio (GaAs-AlAs) y las dislocaciones en estos materiales pueden originarse de las desigualdades en las concentraciones en el fundido a partir del cual se crecen los cristales o a que se inducen esfuerzos debido a los gradientes térmicos a los que se exponen los cristales durante el enfriamiento de la temperatura de crecimiento.

4-5 Ley de Schmid

Se pueden comprender las diferencias en el comportamiento de los metales que tienen estructuras cristalinas distintas examinando la fuerza requerida para iniciar el proceso del deslizamiento. Suponga que se aplica una fuerza unidireccional F a un cilindro de metal que es un monocristal (figura 4-13). Se pueden orientar el plano de deslizamiento y la dirección de deslizamiento a la fuerza aplicada definiendo los ángulos λ y ϕ . El ángulo entre la dirección de deslizamiento y la fuerza aplicada es λ y ϕ es el ángulo entre la normal al plano de deslizamiento y la fuerza aplicada. Observe que la suma de los ángulos ϕ y λ puede, pero no necesariamente debe ser de 90° .

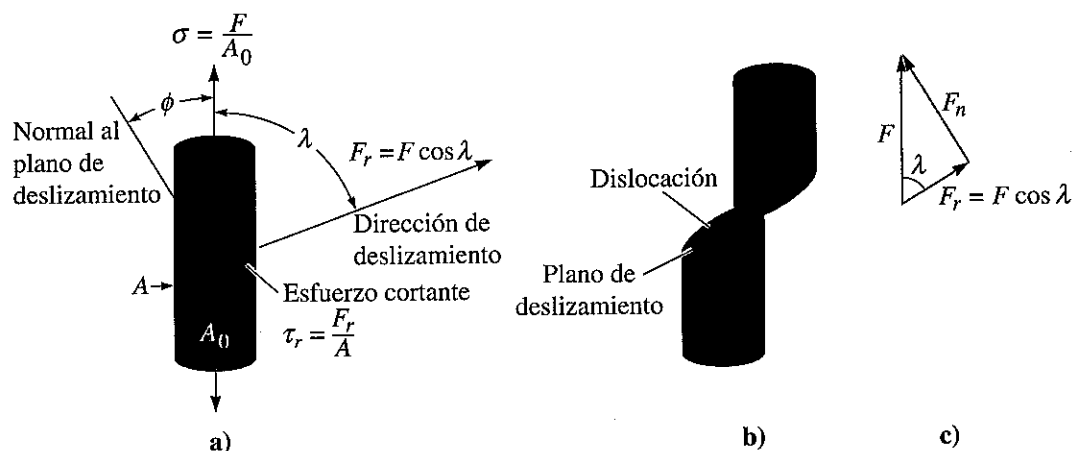


Figura 4-13 a) Se produce un esfuerzo cortante τ resuelto en el sistema de deslizamiento. [Nota: $(\phi + \lambda)$ no tiene que ser 90° .] b) El movimiento de las dislocaciones en el sistema de deslizamiento deforma el material. c) Resolución de la fuerza.

Para que la dislocación se mueva en su sistema de deslizamiento, debe producirse por medio de la fuerza aplicada una fuerza de corte que actúe en la dirección de deslizamiento. Esta fuerza de corte resuelta F_r está dada por:

$$F_r = F \cos \lambda$$

Si se divide la ecuación entre el área del plano de deslizamiento, $A = A_0 / \cos \phi$, se obtiene la siguiente ecuación conocida como **ley de Schmid**,

$$\tau_r = \sigma \cos \phi \cos \lambda \quad (4-3)$$

donde

$$\tau_r = \frac{F_r}{A} = \text{esfuerzo cortante resuelto en la dirección de deslizamiento}$$

y

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \text{esfuerzo normal aplicado al cilindro}$$

Ejemplo 4-9

Calculo del esfuerzo cortante resuelto

Aplice la ley de Schmid para una situación en la que el monocristal está orientado de tal manera que el plano de deslizamiento es perpendicular al esfuerzo de tensión aplicado.

SOLUCIÓN

Suponga que el plano de deslizamiento es perpendicular al esfuerzo aplicado σ , como en la figura 4-14. Entonces $\phi = 0$, $\lambda = 90^\circ$, $\cos \lambda = 0$, y por tanto $\tau_r = 0$. Como se observó anteriormente, los ángulos ϕ y λ pueden pero no siempre sumar 90° . Aun si el esfuerzo aplicado σ es enorme, no se desarrolla ningún esfuerzo cortante a lo largo de la dirección de deslizamiento y la dislocación no puede moverse. (Podría desarrollar un experimento sencillo para demostrar esto con un mazo de cartas. Si presiona el mazo en un ángulo, las cartas se deslizarán una sobre otra, como en el proceso del deslizamiento. Sin embargo, si presiona de manera perpendicular al mazo las cartas no se deslizarán.) No puede ocurrir deslizamiento si el sistema de deslizamiento está orientado de tal manera que λ o ϕ es de 90° .

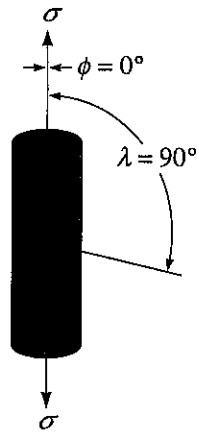


Figura 4-14

Cuando el plano de deslizamiento es perpendicular al esfuerzo aplicado σ , el ángulo λ es de 90° y no se resuelve ningún esfuerzo cortante.

El **esfuerzo cortante resuelto crítico** τ_{irc} es el esfuerzo cortante requerido para que ocurra el deslizamiento. Por tanto el deslizamiento ocurre, ocasionando que el material se deforme de manera plástica, cuando el esfuerzo *aplicado* (σ) produce un esfuerzo cortante *resuelto* (τ_r) que es igual al esfuerzo cortante resuelto crítico:

$$\tau_r = \tau_{\text{irc}} \quad (4-4)$$

Ejemplo 4-10

Diseño de un proceso de colado de un monocristal

Se desea producir una barra compuesta de un monocristal de aluminio puro, el cual tiene un esfuerzo cortante resuelto crítico de 148 psi. Se desearía orientar la barra de tal manera que, cuando se aplique un esfuerzo axial de 500 psi, la barra se deforme por el deslizamiento en una dirección de 45° respecto al eje de la barra y accione un sensor que detecte la sobrecarga. Diseñe la barra y un método por medio del cual podría producirse.

SOLUCIÓN

Las dislocaciones comienzan a moverse cuando el esfuerzo cortante resuelto τ_r es igual al esfuerzo cortante resuelto crítico, de 148 psi. A partir de la ley de Schmid:

$$\tau_r = \sigma \cos \lambda \cos \phi$$

$$148 \text{ psi} = (500 \text{ psi}) \cos \lambda \cos \phi$$

Debido a que se desea que el deslizamiento ocurra a un ángulo de 45° respecto al eje de la barra, $\lambda = 45^\circ$ y

$$\cos \phi = \frac{148}{500 \cos 45^\circ} = 0.4186$$

$$\phi = 65.3^\circ$$

Por tanto se debe producir una barra que se oriente de tal manera que $\lambda = 45^\circ$ y $\phi = 65.3^\circ$. Observe que ϕ y λ no suman 90° .

Se podría realizar esto por medio de un proceso de solidificación. Se podría orientar un cristal semilla de aluminio sólido en la parte inferior de un molde. El aluminio líquido podría introducirse en el molde. El líquido se solidifica en el cristal semilla y se produce una barra de monocristal con la orientación apropiada.

4-6 Influencia de la estructura cristalina

Se puede utilizar la ley de Schmid para comparar las propiedades de los metales que tienen estructuras cristalinas CCCu, CCCa y CH. La tabla 4-2 lista tres factores importantes que se pueden examinar. Sin embargo, debe ser cuidadoso al observar que esta explicación describe el comportamiento de monocristales casi perfectos. Los materiales de ingeniería reales rara vez son monocristales y siempre contienen gran cantidad de defectos. También tienden a ser policristalinos. Dado que distintos cristales o granos están orientados en diferentes direcciones aleatorias, no se puede aplicar la ley de Schmid para predecir el comportamiento mecánico de los materiales policristalinos.

Esfuerzo cortante resuelto crítico Si el esfuerzo cortante resuelto crítico en un metal es muy alto, el esfuerzo aplicado τ también debe ser alto para que τ_r sea igual a τ_{tcr} . Un τ_{tcr} más alto implica que se necesita un esfuerzo más alto para deformar un metal de manera plástica, ¡lo cual a su vez indica que el metal tiene una resistencia alta! En los metales CCCa, los cuales tienen planos compactos {111}, el esfuerzo cortante resuelto crítico es baja, alrededor de 50 a 100 psi en un cristal perfecto. Por otro lado, las estructuras cristalinas CCCu contienen planos no compactos y se debe exceder un esfuerzo cortante resuelto crítico mayor, en el orden de 10 000 psi en los cristales perfectos, antes de que ocurra el deslizamiento; por tanto, los metales CCCu tienden a tener resistencias altas y ductilidades más bajas en comparación con los metales CCCa.

Se esperaría que los metales CH, debido a que contienen planos basales compactos, tengan esfuerzos cortantes resueltos críticos bajos. De hecho, en los metales CH como el zinc que tiene una razón c/a mayor que o igual a la razón teórica de 1.633, la tensión cortante resuelto crítico es menor a 100 psi, tal como en los metales CCCa. Sin embargo, en el titanio CH, la razón c/a es menor a 1.633; los planos compactos están espaciados de manera muy estrecha. El deslizamiento ocurre ahora en los planos como el (10 $\bar{1}$ 0), los planos o caras del “prisma” del hexágono, y el esfuerzo cortante resuelto crítico es entonces tan grande que o mayor que en los metales CCCu.

Número de sistemas de deslizamiento Si al menos un sistema de deslizamiento está orientado para formar ángulos λ y ϕ cercanos a 45°, entonces τ_r es igual a τ_{tcr} a esfuerzos aplicados bajos. Los metales CH ideales sólo poseen un conjunto de planos compactos paralelos, los planos (0001), y tres direcciones compactas, lo que da tres sistemas de deslizamiento. En consecuencia, la probabilidad de que los planos y las direcciones compactos estén orientados con λ y ϕ cercanos a 45° es muy baja. El cristal CH puede fallar de manera quebradiza sin una cantidad significativa de deslizamiento; sin embargo, en los metales CH con una razón c/a baja, o cuando los metales CH están aleados de manera apropiada, o cuando se aumenta la temperatura, otros sistemas de deslizamiento se vuelven activos, haciendo que estos metales sean menos quebradizos de lo esperado.

TABLA 4-2 ■ Resumen de los factores que afectan el deslizamiento en las estructuras metálicas

Factor	CCCa	CCCu	CH $\left(\frac{c}{a} \geq 1.633\right)$
Esfuerzo cortante resuelto crítico (psi)	50-100	5 000-10 000	50-100 ^a
Número de sistemas de deslizamiento	12	48	3 ^b
Deslizamiento cruzado	Puede ocurrir	Puede ocurrir	No puede ocurrir ^b
Resumen de las propiedades	Dúctil	Resistente	Relativamente quebradizo

^aPara el deslizamiento en los planos basales.

^bAl alea o calentar a altas temperaturas se activan sistemas de deslizamiento adicionales en los metales CH, lo que permite que ocurra un deslizamiento cruzado y por tanto se mejore la ductilidad.

Por otro lado, los metales CCCa contienen cuatro planos compactos no paralelos de la forma $\{111\}$ y tres direcciones compactas de la forma $\langle 110 \rangle$ dentro de cada plano, lo que da un total de 12 sistemas de deslizamiento. Al menos un sistema de deslizamiento está orientado de manera favorable para que se lleve a cabo el deslizamiento a esfuerzos aplicados bajos, permitiendo que los metales CCCa tengan ductilidades altas.

Por último, los metales CCCu tienen hasta 48 sistemas de deslizamiento que están estrechamente compactados. Varios sistemas de deslizamiento siempre están orientados de manera apropiada para que ocurra el deslizamiento, lo que permite que los metales CCCu también tengan ductilidad.

Deslizamiento cruzado Considere una dislocación helicoidal que se mueve en un plano de deslizamiento que encuentra un obstáculo y es bloqueada como para seguir en movimiento. Esta dislocación puede desplazarse a un segundo sistema de deslizamiento intersecante, también orientado de manera apropiada, y continuar moviéndose. A esto se le llama deslizamiento cruzado. En muchos metales CH no puede ocurrir el deslizamiento cruzado debido a que los planos de deslizamiento son paralelos (es decir, no intersecantes). Por tanto, los metales CH policristalinos tienden a ser quebradizos. Afortunadamente, sistemas de deslizamiento adicionales se vuelven activos cuando los metales CH se alean o calientan, por tanto se mejora la ductilidad. El deslizamiento cruzado es posible en los metales CCCa y CCCu debido a que están presentes varios sistemas de deslizamiento intersecantes. En consecuencia, el deslizamiento cruzado ayuda a mantener la ductilidad en estos metales.

Ejemplo 4-11

Ductilidad de los materiales monocristalinos y policristalinos metálicos CH

Un monocristal de magnesio (Mg), el cual tiene la estructura cristalina CH, puede estirarse en una forma parecida a una cinta de cuatro a seis veces su longitud original; sin embargo, el Mg *policristalino* y otros metales con la estructura CH muestran ductilidades limitadas. Utilice los valores del esfuerzo cortante resuelto crítico para los metales con distintas estructuras cristalinas y la naturaleza de la deformación en los materiales policristalinos para explicar esta observación.

SOLUCIÓN

A partir de la tabla 4-2 se observa que para los metales CH como el Mg, el esfuerzo cortante resuelto crítico es bajo (de 50-100 psi). También se observa que el deslizamiento en los metales CH ocurrirá con facilidad en el plano basal, el plano de deslizamiento principal. Cuando se deforma un monocristal, suponiendo que el plano basal está orientado de manera adecuada con respecto al esfuerzo aplicado, puede ocurrir una deformación grande. Esto explica por qué el Mg monocristalino puede estirarse en una cinta de cuatro a seis veces la longitud original. Cuando se tiene Mg policristalino la deformación no es tan sencilla. Cada cristal debe deformarse de tal manera que el esfuerzo desarrollado en cualquier cristal sea acomodado por sus vecinos.

En los metales CH no hay sistemas de deslizamiento intersecantes; por tanto, las dislocaciones no pueden deslizarse de un plano de deslizamiento en un cristal (grano) a otro plano de deslizamiento en un cristal vecino. Como resultado, los metales CH policristalinos como el Mg muestran ductilidad limitada.

4-7 Defectos superficiales

Los **defectos superficiales** son los límites, o planos, que separan un material en regiones. Por ejemplo, cada región puede tener la misma estructura cristalina pero orientaciones distintas.

Superficie del material Las dimensiones exteriores del material representan las superficies en las que el cristal termina de manera abrupta. Cada átomo en la superficie ya no posee el número de coordinación apropiado y se interrumpe el enlazamiento atómico. La superficie exterior también puede ser muy áspera, contener muescas diminutas y ser mucho más reactiva que la mayor parte del material.

En los materiales con nanoestructura, la razón del número de átomos o iones en la superficie a la del volumen es muy alta. Como resultado, estos materiales tienen un área de superficie por unidad de masa grande. En el refinamiento del petróleo y muchas otras áreas de la tecnología, se usan catalizadores de área de superficie alta para el mejoramiento de la cinética de las reacciones químicas. De manera similar a los materiales a nanoescala, la razón área de superficie a volumen es alta para los materiales porosos, geles y polvos ultrafinos. Más adelante aprenderá que la reducción en el área de superficie es la fuerza conductora termodinámica para la **sinterización** de las cerámicas y los polvos metálicos.

Límites de grano La microestructura de muchas cerámicas de ingeniería y materiales metálicos consiste en muchos granos. Un **grano** es una porción del material dentro de la cual el arreglo de los átomos es casi idéntico; sin embargo, la orientación del arreglo de átomos, o estructura cristalina, es distinta para cada grano vecino. En la figura 4-15a) se muestran de manera esquemática tres granos; el arreglo de los átomos en cada grano es idéntico pero los granos están orientados de manera distinta. Un **límite de grano**, la superficie que separa los granos individuales, es una zona angosta en la que los átomos no están espaciados de manera apropiada. En otras palabras, los átomos están tan cercanos entre sí en algunas localizaciones en los límites de los granos que ocasionan una región de compresión y en otras áreas están tan alejados que ocasionan una región de tensión. La figura 4-15b), muestra una micrografía de los granos en una muestra de acero inoxidable.

Un método para controlar las propiedades de un material es por medio del control del tamaño del grano. Al reducir el tamaño del grano, se incrementa el número de granos y, por tanto, aumenta la cantidad del área de los límites de los granos. Cualquier dislocación sólo se mueve una distancia corta antes de que se encuentre con un límite de grano y se incrementa la resistencia del material metálico. La **ecuación de Hall-Petch** relaciona el tamaño del grano con el **límite elástico**,

$$\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{-1/2} \quad (4-5)$$

donde σ_y es el límite elástico (el nivel de esfuerzo necesario para ocasionar una cierta cantidad de deformación permanente), d es el diámetro promedio de los granos y σ_0 y K son constantes

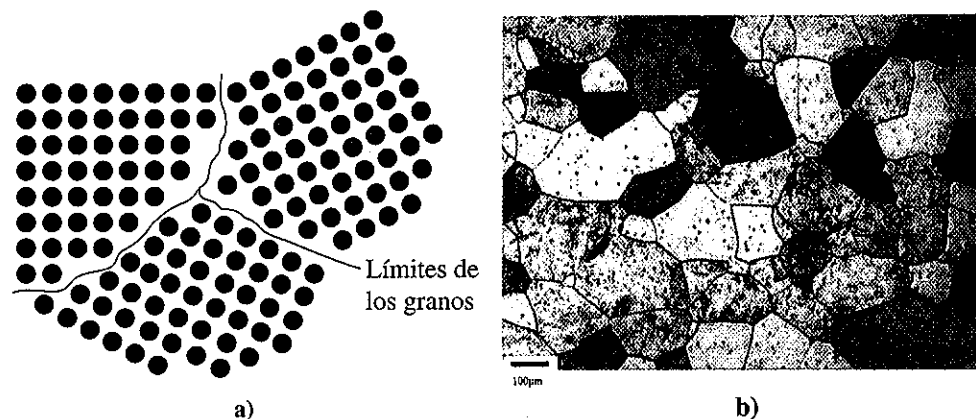


Figura 4-15 a) Los átomos cerca de los límites de los tres granos no tienen un espaciado o arreglo de equilibrio. b) Granos y límites de grano en una muestra de acero inoxidable. (Micrografía cortesía del Dr. A. J. Deardo.)

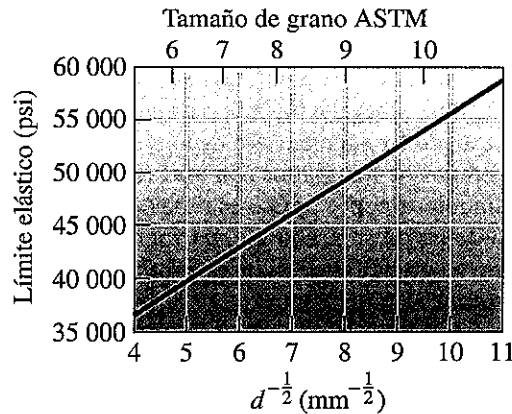


Figura 4-16
Efecto del tamaño de grano sobre el límite elástico del acero a temperatura ambiente.

para el metal. Recuerde del capítulo 1 que el límite elástico de un material metálico es el nivel mínimo de esfuerzo que se necesita para iniciar la deformación plástica (permanente). La figura 4-16 muestra esta relación en el acero. La ecuación de Hall-Petch no es válida para los materiales con granos inusualmente grandes o ultrafinos. En los capítulos siguientes se describirá cómo el tamaño de grano de los metales y las aleaciones puede controlarse a través de la solidificación, la aleación y el tratamiento térmico.

Ejemplo 4-12

Relación de un acero dulce

El límite elástico del acero dulce con un tamaño de grano promedio de 0.05 mm es de 20 000 psi. El límite elástico del mismo acero con un tamaño de grano de 0.007 mm es de 40 000 psi. ¿Cuál será el tamaño de grano promedio del mismo acero con una fluencia de 30 000 psi? Suponga que la ecuación de Hall-Petch es válida y que los cambios en el esfuerzo de cedencia observado se deben a los cambios en el tamaño del grano.

SOLUCIÓN

$$\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$$

Por tanto, para un tamaño del grano de 0.05 mm el esfuerzo de cedencia es

$$20\,000 \text{ psi} (6.895 \text{ MPa}) / (1000 \text{ psi}) = 137.9 \text{ MPa}$$

(Nota: 1000 psi = 6.895 MPa.) Utilizando la ecuación de Hall-Petch

$$137.9 = \sigma_0 + \frac{K}{\sqrt{0.05}}$$

Para el tamaño de grano de 0.007 mm, el esfuerzo de cedencia es de 40 000 psi (6.895 MPa) (1000 psi) = 275.8 MPa. Por tanto, utilizando de nuevo la ecuación de Hall-Petch:

$$275.8 = \sigma_0 + \frac{K}{\sqrt{0.007}}$$

La solución de estas dos ecuaciones es $K = 18.44 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ y $\sigma_0 = 55.5 \text{ MPa}$. Ahora se tiene la ecuación de Hall-Petch como

$$\sigma_y = 55.5 + 18.44 d^{-1/2}$$

Si se desea un esfuerzo de cedencia de 30 000 psi o 206.9 MPa, el tamaño de grano debe ser de 0.0148 mm.

La *microscopía óptica* es una técnica que se utiliza para revelar características microestructurales como los límites de los granos que requieren menos de alrededor de 2000 magnificaciones. Al proceso de la preparación de una muestra metálica y la observación o registro de su microestructura se le llama **metalografía**. Una muestra del material se lija y se pule a un acabado parecido a un espejo. La superficie se expone a un ataque químico, o *grabado a agua fuerte*, en el que los límites de los granos son atacados de manera más agresiva que el resto del grano. La luz de un microscopio óptico es reflejada o dispersada de la superficie de la muestra, dependiendo de cómo se grabó a agua fuerte la superficie. Cuando se dispersa más luz de las características grabadas de manera profunda como los límites de los granos, estas características aparecen oscuras (figura 4-17). En las muestras cerámicas se utiliza con frecuencia una técnica conocida como **ranurado térmico** para observar los límites de los granos. Involucra pulir y calentar una muestra cerámica a temperaturas debajo de la temperatura de sinterización (1300 °C) por un corto periodo. La sinterización es un proceso para la formación de una masa densa por medio del calentamiento del material en polvo compactado.

Una forma de especificar el tamaño del grano es utilizando el **número de tamaño de grano ASTM** (ASTM es la American Society for Testing and Materials). El número de granos por pulgada cuadrada se determina a partir de una fotografía del metal tomada a una magnificación de 100. El número de tamaño de grano ASTM n se calcula como

$$N = 2^{n-1} \quad (4-6)$$

donde N es el número de granos por pulgada cuadrada.

Un número ASTM grande indica muchos granos, o un tamaño de grano fino, y se correlaciona con las resistencias altas de los metales.

Cuando se describe una microestructura, siempre que es posible, es preferible utilizar un marcador micrométrico o alguna otra escala en el micrográfico, en lugar de enunciar la magnificación como $\times$, como en la figura 4-17. De esta manera, si la micrografía se agranda o se reduce, las escalas del marcador micrométrico las hacen con él y no se tiene que preocupar acerca de los cambios en la magnificación de la micrografía original. Están disponibles varios programas de **análisis de imágenes** sofisticados. Al utilizar tales programas, no sólo es posible obtener información sobre el número ASTM de tamaño de grano sino también información cuantitativa sobre el tamaño de grano promedio, la distribución del tamaño de los granos, la porosidad, las segundas fases (capítulo 10), etc. Se pueden adquirir varios microscopios electrónicos ópticos y de barrido con capacidades de análisis de imagen. El siguiente ejemplo ilustra el cálculo del número ASTM de tamaño de grano.

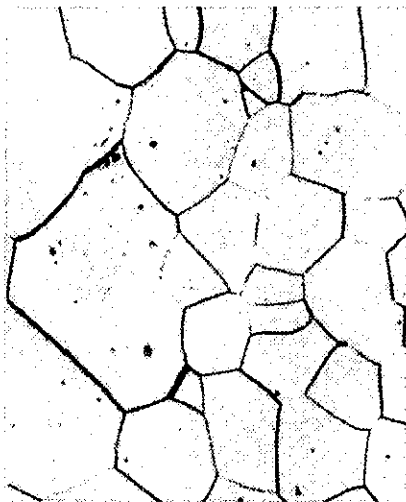


Figura 4-17

Microestructura del paladio (100 $\times$). (De ASM Handbook, Vol. 9, Metallography and Microstructure (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073.)

Ejemplo 4-13*Cálculo del número ASTM de tamaño de grano*

Suponga que se cuentan 16 granos por pulgada cuadrada (pulg^2) en una fotomicrografía tomada a una magnificación de 250. ¿Cuál es el número ASTM de tamaño del grano?

SOLUCIÓN

Considere una pulgada cuadrada de la fotomicrografía tomada a una magnificación de 250. A una magnificación de 100, la región de una pulgada cuadrada de la magnificación de la imagen de 250 aparecería como

$$1 \text{ pulg}^2 \left(\frac{100}{250} \right)^2 = 0.16 \text{ pulg}^2$$

y se observarían

$$\frac{16 \text{ granos}}{0.16 \text{ pulg}^2} = 100 \text{ granos/pulg}^2$$

Al sustituir en la ecuación 4-6,

$$\begin{aligned} N &= 100 \text{ granos/pulg}^2 = 2^{n-1} \\ \log 100 &= (n - 1) \log 2 \\ 2 &= (n - 1)(0.301) \\ n &= 7.64 \end{aligned}$$

Límites de grano de ángulo pequeño Un límite de grano de ángulo pequeño es un arreglo de las dislocaciones que produce una desorientación pequeña entre los cristales adyacentes (figura 4-18). Debido que la energía de la superficie es menor que la de un límite de grano regular, los límites de granos de ángulo pequeño no son tan efectivos al bloquear deslizamientos. A los límites de ángulo pequeño formados por dislocaciones de arista se les llama **límites inclinados** y a los ocasionados por dislocaciones se les llama **límites de giro**.

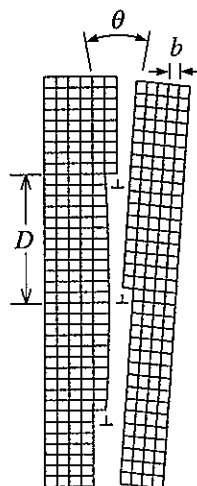


Figura 4-18

El límite de grano de ángulo pequeño se produce por medio de un arreglo de las dislocaciones, que ocasiona un desajuste angular θ entre las redes en cualquier lado del límite.

Fallas de apilamiento Las fallas de apilamiento, las cuales ocurren en metales CCCa, representan un error en la secuencia de apilamiento de los planos compactos. Por lo general, se produce una secuencia de apilamiento $ABC\ ABC\ ABC$ en un cristal CCCa perfecto. Suponga que en su lugar se produce la siguiente secuencia:



En la porción de la secuencia indicada, un plano del tipo *A* reemplaza un plano del tipo *C*. Esta región pequeña, la cual tiene una secuencia de apilamiento CH en lugar de la secuencia de apilamiento CCCa, representa una falla de apilamiento. Las fallas de apilamiento interfieren con el proceso de deslizamiento.

Límites de macla Un límite de macla es un plano a través del cual hay una desorientación especial de imagen especular de la estructura cristalina (figura 4-19). Los límites de macla pueden producirse cuando una fuerza de corte, que actúa a lo largo del límite de macla, ocasiona que los átomos se desplacen de su posición. Los límites de macla ocurren durante la deformación o el tratamiento térmico de ciertos metales. Estos límites interfieren con el proceso de deslizamiento e incrementan la resistencia del metal. Los límites de macla también se presentan en algunos materiales cerámicos como la zirconia monoclínica y el silicato de dicalcio.

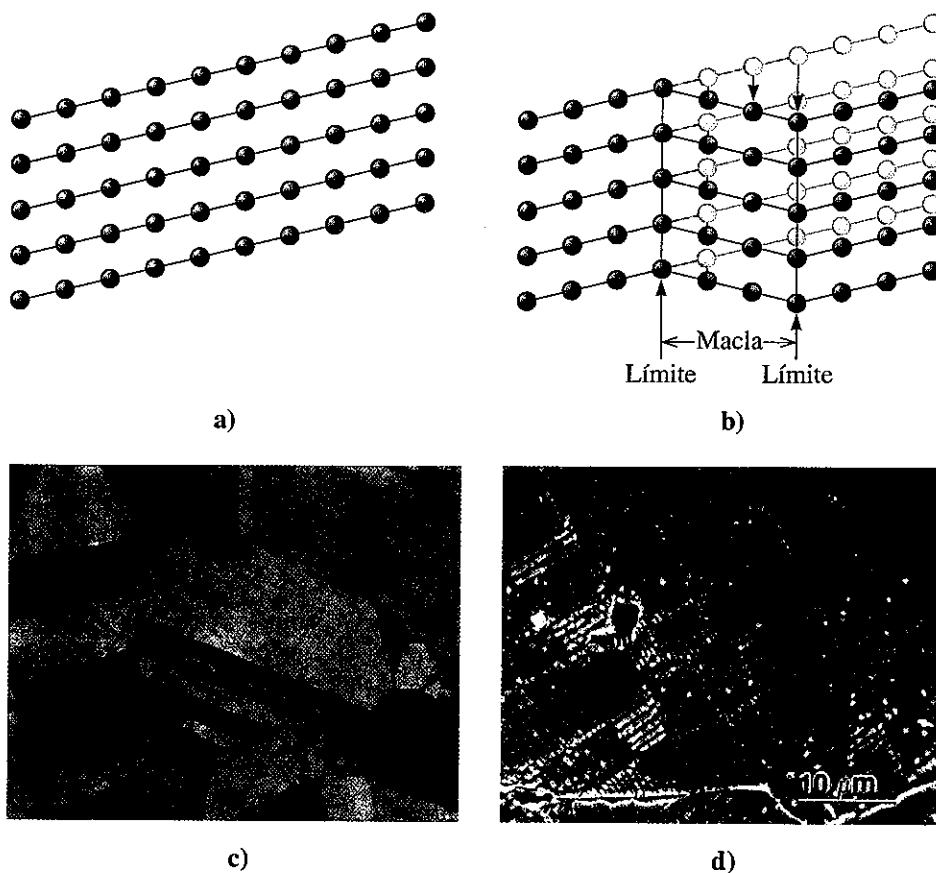


Figura 4-19 La aplicación de un esfuerzo al a) cristal perfecto puede ocasionar un desplazamiento de los átomos, b) que resulta en la formación de una macla. Observe que el cristal se ha deformado como resultado del maclado. c) Una micrografía de las maclas dentro de un grano de latón (250×). d) Dominios en el titanato de bario ferroeléctrico. (Cortesía del Dr. Rodney Roseman, University of Cincinnati.) En los materiales magnéticos ocurren estructuras con dominios similares.

TABLA 4-3 ■ Energía de las imperfecciones superficiales en algunos metales

Imperfección superficial (ergs/cm ²)	Al	Cu	Pt	Fe
Falla de apilamiento	200	75	95	—
Límite de macla	120	45	195	190
Límite de grano	625	645	1000	780

La efectividad de los defectos superficiales para interferir con el proceso de deslizamiento puede juzgarse a partir de las energías superficiales (tabla 4-3). Los límites de grano de energía alta son mucho más efectivos para bloquear las dislocaciones que las fallas de apilamiento o las maclas.

Límites del dominio Los ferroeléctricos son materiales que desarrollan una polarización dieléctrica espontánea y reversible (por ejemplo, el PZT o el BaTiO₃) (véase el capítulo 19). Los materiales magnéticos también desarrollan una magnetización de manera similar (por ejemplo, el Fe, Co, Ni, óxido de hierro, etc.) (véase el capítulo 20). Estos materiales electrónicos y magnéticos contienen dominios. Un **dominio** es una región pequeña del material en el que la dirección de la magnetización o de la polarización dieléctrica permanece igual. En estos materiales se forman varios dominios pequeños por lo que se minimiza la energía libre total del material. La figura 4-19d) muestra un ejemplo de los dominios en el titanato de bario ferroeléctrico tetragonal. La presencia de los dominios influye en las propiedades dieléctricas y magnéticas de muchos materiales electrónicos y magnéticos. En capítulos posteriores se explicarán estos materiales.

4-8 Importancia de los defectos

Los defectos extendidos y los puntuales desempeñan una función principal al influir en las propiedades mecánicas, eléctricas, ópticas y magnéticas de los materiales de ingeniería. En esta sección, se recapitula la importancia de los defectos sobre las propiedades de los materiales. Se enfatiza que el efecto de las dislocaciones es el más importante en los materiales metálicos.

Efecto sobre las propiedades mecánicas mediante el control del proceso de deslizamiento Cualquier imperfección en el cristal eleva la energía interna en la localización de la imperfección. La energía local se aumenta debido a que, cerca de la imperfección, los átomos se acercan de manera estrecha (compresión) o son forzados a separarse bastante (tensión).

Una dislocación en un cristal metálico que de otra manera sería perfecto puede moverse con facilidad a través del cristal si el esfuerzo cortante resuelto es igual al esfuerzo cortante resuelto crítico. Sin embargo, si la dislocación se encuentra en una región donde los átomos están desplazados de sus posiciones usuales, se requiere un esfuerzo mayor para forzar el paso dislocación por la región de energía local alta; por tanto, el material es más resistente. *Los defectos en los materiales, como las dislocaciones, los defectos puntuales y los límites de grano, funcionan como "señales de alto" para las dislocaciones.* Proveen resistencia al movimiento de las dislocaciones y cualquier mecanismo que impide el movimiento de las dislocaciones hace más resistente a un metal. Por tanto, se puede controlar la resistencia de un material metálico controlando el número y tipo de imperfecciones. Tres mecanismos de endurecimiento comunes se basan en las tres categorías de defectos en los cristales. Dado que el movimiento de las dislocaciones es relativamente más fácil en los metales y aleaciones, por lo general estos mecanismos funcionan mejor en los materiales metálicos. Se necesita tener en cuenta que con mucha frecuencia la resistencia de las cerámicas en tensión y a temperaturas bajas está dictada por el nivel de porosidad (presencia de orificios pequeños). Los polímeros

con frecuencia son amorfos y por tanto las dislocaciones desempeñan una función muy pequeña en su comportamiento mecánico, como se explica en un capítulo posterior. La resistencia de los vidrios inorgánicos (por ejemplo, el vidrio flotado de silicato) depende de la distribución de los defectos en la superficie.

Endurecimiento por deformación Las dislocaciones afectan la perfección de la estructura cristalina. En la figura 4-20, los átomos debajo de la línea de la dislocación en el punto *B* están comprimidos, mientras que los átomos arriba de la dislocación *B* están muy separados. Si se mueve a la derecha la dislocación *A* y pasa cerca de la dislocación *B*, la dislocación *A* encuentra una región donde los átomos no están arreglados de manera apropiada. Se requieren esfuerzos más altos para que la segunda dislocación se siga moviendo; en consecuencia, el metal debe ser más resistente. El incremento del número de dislocaciones aumenta la resistencia del material dado que el aumento en la densidad de dislocaciones ocasiona más señales de alto para el movimiento de las dislocaciones. Puede demostrarse que la densidad de dislocaciones aumenta de manera notable a medida que deforma el material. A este mecanismo para aumentar la resistencia de un material por medio de la deformación se le conoce como **endurecimiento por deformación**, el cual se explica en el capítulo 8. También puede demostrarse que las densidades de las dislocaciones pueden reducirse de manera sustancial calentando un material metálico a una temperatura relativamente alta (debajo de la temperatura de fusión) y manteniéndola durante un periodo largo. A este tratamiento térmico se le conoce como **recocido** y se utiliza para impartir ductilidad a los materiales metálicos. Por tanto, el control de la densidad de las dislocaciones es una manera importante para controlar la resistencia y ductilidad de los metales y aleaciones.

Endurecimiento por solución sólida Cualquiera de los defectos puntuales también afecta la perfección de la estructura cristalina. Se forma una solución sólida cuando los átomos o iones de un elemento o compuesto huésped son asimilados por completo en la estructura cristalina del material anfitrión. Es decir similar a la manera en la que la sal o el azúcar en concentraciones pequeñas se disuelven en el agua. Si se mueve a la izquierda la locación *A* (figura 4-20), se encuentra con un cristal afectado por el defecto puntual; se necesitan esfuerzos más altos para continuar el deslizamiento de la dislocación. Al introducir de manera intencional átomos sustitucionales o intersticiales, se ocasiona un **endurecimiento por solución sólida**, el cual se explica en el capítulo 10. Este mecanismo explica por qué el acero al carbono no aleado es más resistente que el Fe puro y por qué las aleaciones de cobre que contienen concentraciones pequeñas de Be son mucho más resistentes que el Cu puro. El oro y la plata puros, ambos metales CCCa con varios sistemas de deslizamiento activos, son mecánicamente muy blandos.

Endurecimiento por tamaño de grano Las imperfecciones de la superficie tales como los límites de grano afectan el arreglo de átomos en los materiales cristalinos. Si se mueve a la derecha la dislocación *B* (figura 4-20), se encuentra con un límite de grano y es bloqueada. Al aumentar el número de granos o al reducir el tamaño del grano, se logra el **endurecimiento por tamaño de grano** en los materiales metálicos. El control del tamaño de grano se explicará en varios de los capítulos posteriores.

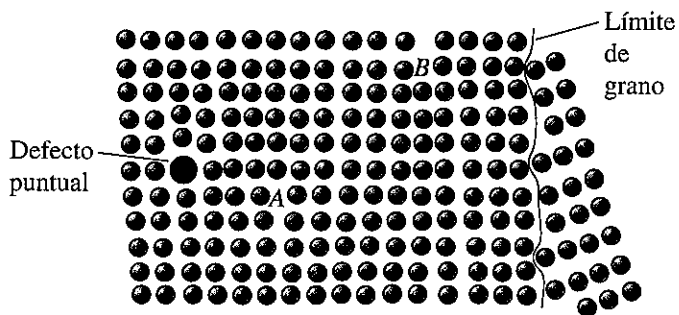


Figura 4-20

Si se mueve a la izquierda la dislocación en el punto *A*, es bloqueada por el defecto puntual. Si la dislocación se mueve a la derecha, interactúa con la red alterada cerca de la segunda dislocación en el punto *B*. Si la dislocación se mueve más a la derecha, es bloqueada por un límite de grano.

Existen otros dos mecanismos más para el endurecimiento de los metales y aleaciones. A éstos se les conoce como **endurecimiento de segunda fase** y **endurecimiento por precipitación**. En capítulos posteriores se explicarán.

Ejemplo 4-14

Diseño de un soporte para ladrillos cerámicos

Se desea producir un soporte para sostener ladrillos cerámicos en su lugar en un horno de tratamiento térmico. El soporte debe ser resistente, debe poseer alguna ductilidad de tal manera que se flexione en vez de fracturarse si se sobrecarga y debe conservar la mayor parte de su resistencia hasta a 600 °C. Diseñe el material para este soporte, considerando las varias imperfecciones cristalinas como el mecanismo de endurecimiento.

SOLUCIÓN

Para funcionar a 600 °C, el soporte *no* debe producirse a partir de un polímero. En su lugar, debe considerarse un metal o una cerámica.

Para tener alguna ductilidad, las dislocaciones deben moverse y ocasionar deslizamiento. Debido a que el deslizamiento en las cerámicas es difícil, el soporte debe producirse a partir de un material metálico. El metal debe tener un punto de fusión muy por encima de los 600 °C; el aluminio, con un punto de fusión de 660 °C, no sería adecuado; sin embargo, el hierro sería una elección razonable.

Se pueden introducir imperfecciones puntuales, lineales y superficiales en el hierro para ayudar a producir resistencia, pero se desea que las imperfecciones sean estables a medida que se incrementa la temperatura. Como se muestra en el capítulo 5, los granos pueden crecer a temperaturas elevadas, reduciendo el número de los límites de grano y ocasionando una disminución en la resistencia. Como se indica en el capítulo 8, las dislocaciones pueden eliminarse a temperaturas elevadas, de nuevo, reduciendo la resistencia. El número de vacancias depende de la temperatura, por lo que el control de los defectos cristalinos puede no producir propiedades estables.

Sin embargo, el número de átomos intersticiales o sustitucionales en el cristal no cambia con la temperatura. Se podría adicionar carbono al hierro como átomos intersticiales o átomos de vanadio sustitutos para los átomos de hierro en los puntos de red normales. Estos defectos puntuales continúan interfiriendo con el movimiento de las dislocaciones y ayudan a mantener la resistencia estable.

Por supuesto, también pueden ser importantes otros requerimientos de diseño. Por ejemplo, el soporte de acero puede deteriorarse por la oxidación o puede reaccionar con el ladrillo cerámico.

Efectos sobre las propiedades eléctricas, ópticas y magnéticas

En las secciones anteriores se enunció que el efecto de los defectos puntuales sobre las propiedades eléctricas de los semiconductores es dramático. Toda la industria de la microelectrónica depende de manera crítica de la incorporación exitosa de dopantes sustitucionales como el P, As, B y Al en el Si y otros semiconductores. Estos átomos dopantes permiten tener un control significativo de las propiedades eléctricas de los semiconductores. Los dispositivos hechos de Si, GaAs, silicio amorfo (a:Si:H), etc., dependen de manera crítica de la presencia de átomos dopantes. Se puede formar Si del tipo *n* introduciendo átomos de P en el Si. Se puede formar Si del tipo *p* utilizando átomos de B. De manera similar, varios de los enlaces en el silicio amorfo que de otra manera no serían satisfactorios se completan incorporando átomos de H.

El efecto de los defectos como las dislocaciones sobre las propiedades de los semiconductores por lo general es perjudicial. Las dislocaciones y otros defectos (incluyendo otros defectos puntuales) pueden interferir con el movimiento de los portadores de carga eléctrica en los semiconductores. Ésta es la razón por la que se asegura que las densidades en

las dislocaciones en el silicio monocristalino y otros materiales utilizados en aplicaciones ópticas y eléctricas son muy pequeñas. Los defectos puntuales también ocasionan el incremento de la resistividad en los metales.

En algunos casos los defectos pueden mejorar ciertas propiedades. Por ejemplo, la incorporación de CaO en la ZrO_2 ocasiona un incremento en la concentración de las vacancias del ion oxígeno. Éste es un efecto benéfico en la conductividad de la zirconia y permite el uso de tales composiciones para sensores de gas oxígeno y celdas de combustible de óxido sólido. ¡Los defectos pueden convertir muchos materiales dieléctricos que de otra manera serían aislantes en semiconductores útiles! Éstos se utilizan para muchas aplicaciones de sensores (por ejemplo, sensores de temperatura, humedad y gases, etcétera).

La adición de alrededor de 1% de óxido de cromo en la alúmina crea defectos que hacen a la alúmina de color rojo rubí. De manera similar, la incorporación de Fe^{+2} y Ti^{+4} hace azul al zafiro. Los nanocristales de materiales como el sulfuro de cadmio (CdS) en los vidrios orgánicos producen vidrios que tienen un color brillante. Los nanocristales de haluro de plata y otros cristales también permiten la formación de vidrios fotocromáticos y fotosensibles.

Muchos materiales magnéticos pueden procesarse de tal manera que los límites de grano y otros defectos hacen más difícil revertir la magnetización en estos materiales. Las propiedades magnéticas de muchas ferritas comerciales, utilizadas en imanes para bocinas y dispositivos de redes de comunicación inalámbrica, dependen de manera crítica de la distribución de los distintos iones en los diferentes sitios cristalográficos en la estructura cristalina. Como se mencionó anteriormente, la presencia de dominios afecta las propiedades de los materiales ferroeléctricos, ferromagnéticos y ferrimagnéticos (capítulos 19 y 20).

Resumen

- Las imperfecciones, o defectos, en un material cristalino son de tres tipos generales: defectos puntuales, defectos lineales o dislocaciones y defectos superficiales.
- El número de vacancias depende de la temperatura del material; con frecuencia se introducen de manera deliberada átomos intersticiales (localizados en los sitios intersticiales entre los átomos normales) y átomos sustitucionales (los cuales reemplazan los átomos huéspedes en los puntos de red) y por lo regular no son afectados por los cambios en la temperatura.
- Las dislocaciones son defectos lineales que, cuando se aplica una fuerza a un material metálico, se mueven y ocasionan que un material metálico se deforme.
- El esfuerzo cortante resuelto crítico es el esfuerzo requerido para mover la dislocación.
- Las dislocaciones se mueven en un sistema de deslizamiento, compuesto por un plano de deslizamiento y una dirección de deslizamiento. La dirección de deslizamiento por lo regular es una dirección compacta. El plano de deslizamiento por lo general también es compacto o casi compacto.
- En los cristales metálicos, el número y tipo de direcciones de deslizamiento y de planos de deslizamiento influyen en las propiedades del metal. En los metales CCCa, el esfuerzo cortante resuelto crítico es bajo y está disponible un número óptimo de planos de deslizamiento; en consecuencia, los metales CCCa tienden a ser dúctiles. En los metales CCCu, no están disponibles planos compactos y el esfuerzo cortante resuelto crítico es alto; por tanto, los metales CCCu tienden a ser resistentes. El número de sistemas de deslizamiento en los metales CH es limitado, lo que ocasiona que estos metales por lo general se comporten de manera quebradiza.
- Los defectos puntuales, los cuales incluyen las vacancias, los átomos intersticiales y los átomos sustitucionales, introducen campos de deformación por compresión o tensión que afectan los arreglos atómicos en el cristal circundante. Como resultado, las dislocaciones no pueden deslizarse con facilidad en la proximidad de los defectos puntuales y aumenta la resistencia del material metálico.

- Los defectos superficiales incluyen los límites de grano. Al producirse un tamaño de grano muy pequeño se incrementa la cantidad del área de los límites de grano; debido a que las dislocaciones no pueden pasar con facilidad a través de un límite de grano, el material se endurece (ecuación de Hall-Petch).
- El número y tipo de los defectos cristalinos controlan la facilidad de movimiento de las dislocaciones y, por tanto, influyen de manera directa en las propiedades mecánicas del material.
- Los defectos en los materiales tienen una influencia significativa sobre sus propiedades eléctricas, ópticas y magnéticas.

Glosario

Análisis de imágenes Técnica que se utiliza para analizar imágenes de microestructuras para obtener información cuantitativa sobre el tamaño del grano, la forma, la distribución de los tamaños de los granos, etcétera.

ASTM American Society for Testing and Materials.

Banda del deslizamiento Colección de muchas líneas del deslizamiento, con frecuencia visibles con facilidad.

Defecto de Frenkel Par de defectos puntuales producido cuando se mueve un ion para crear un sitio intersticial, dejando una vacancia.

Defecto de Schottky Defecto puntuales en los materiales enlazados de manera iónica. Para mantener una carga neutra, debe formarse un número estequiométrico de vacancias de los cationes y aniones.

Defecto intersticial Defecto puntual producido cuando se coloca un átomo en el cristal en un sitio que por lo general no es un punto de red.

Defecto sustitucional Defecto puntual producido cuando se elimina un átomo de un punto de red regular y se reemplaza con un átomo distinto, por lo general de un tamaño diferente.

Defectos puntuales Imperfecciones, como las vacancias, que por lo general se localizan en un sitios de cristal (en algunas ocasiones en unos cuantos).

Defectos superficiales Imperfecciones, como los límites de grano, que forman un plano bidimensional dentro del cristal.

Defectos extendidos Defectos que involucran varios átomos/iones y por tanto ocurren sobre un volumen finito del material cristalino (por ejemplo, las dislocaciones, las fallas de apilamiento, etcétera).

Deformación elástica Deformación que se recupera por completo cuando se elimina el esfuerzo que la ocasiona.

Deformación plástica Deformación permanente de un material cuando se aplica y después se elimina una carga.

Densidad de las dislocaciones Longitud total de la línea de la dislocación por centímetro cúbico en un material.

Deslizamiento Deformación de un material metálico por el movimiento de las dislocaciones a través del cristal.

Deslizamiento cruzado Cambio en el sistema de deslizamiento de una dislocación.

Dirección de deslizamiento Dirección en el cristal en la que se mueve la dislocación. La dirección de deslizamiento es la misma que la dirección del vector de Burgers.

Dislocación Imperfección de línea en un material cristalino. El movimiento de las dislocaciones ayuda a explicar cómo se deforman los materiales metálicos. La interferencia con el movimiento de las dislocaciones ayuda a explicar cómo se endurecen los materiales metálicos.

Dislocación de arista Dislocación introducida en el cristal añadiendo un "medio plano adicional" de átomos.

Dislocación helicoidal Dislocación producida al torcer un cristal en un espaciado atómico de tal manera que se produce una rampa en espiral.

Dislocación mixta Dislocación que contiene de manera parcial componentes de arista y de manera parcial componentes helicoidales.

Dominio Región pequeña de un material ferroeléctrico, ferromagnético o ferrimagnético en el que la dirección de la polarización dieléctrica (para los ferroeléctricos) o la magnetización (para los ferromagnéticos o ferrimagnéticos) sigue siendo la misma.

Dopantes Elementos o compuestos que por lo general se adicionan en concentraciones conocidas y aparecen en lugares específicos dentro de la microestructura, para mejorar las propiedades o el procesamiento de un material.

Ecuación de Hall-Petch Relación entre el límite elástico y el tamaño de grano en un material metálico, es decir, $\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$.

Endurecimiento de segunda fase Mecanismo por medio del cual los granos de un compuesto o fase adicional se introducen en un material policristalino. Estos cristales de segunda fase resisten el movimiento de las dislocaciones, por tanto ocasionan un incremento en la resistencia de un material metálico.

Endurecimiento por deformación Endurecimiento de un material por medio del incremento del número de dislocaciones por deformación, o trabajo en frío. También conocido como “endurecimiento por trabajo”.

Endurecimiento por precipitación Endurecimiento de metales y aleaciones por medio de la formación de precipitados dentro de los granos. Los precipitados pequeños resisten el movimiento de las dislocaciones.

Endurecimiento por tamaño de grano Endurecimiento de un material disminuyendo el tamaño del grano y por tanto incrementando el área de los límites de los granos. Los límites de los granos resisten el movimiento de las dislocaciones y, por tanto, el incremento del área de los límites de los granos conduce a un aumento en la resistencia.

Esfuerzo cortante resuelto crítico Esfuerzo cortante requerido para ocasionar que una dislocación se mueva y ocasione un deslizamiento.

Esfuerzo de Peierls-Nabarro Esfuerzo cortante, que depende del vector de Burgers y del espaciado interplanar, requerido para ocasionar que una dislocación se mueva, es decir, $\tau = c \exp(-kd/b)$.

Falla de apilamiento Defecto de superficie en los metales ocasionado por la secuencia de apilamiento inapropiada de los planos compactos.

Ferroeléctrico Material dieléctrico que desarrolla una polarización eléctrica espontánea y reversible (por ejemplo, el PZT y el BaTiO_3).

Grano Uno de los cristales presentes en un material policristalino.

Impurezas Elementos o compuestos que encuentran la forma de introducirse en un material, con frecuencia se originan del procesamiento o de la materia prima y por lo regular tienen un efecto perjudicial sobre las propiedades o el procesamiento de un material.

Intersticialidad Defecto puntual ocasionado cuando un átomo “normal” ocupa un sitio intersticial en el cristal.

Ley de Schmid Relación entre el esfuerzo cortante, el esfuerzo aplicado y la orientación del sistema de deslizamiento, es decir, $\tau = \sigma \cos \lambda \cos \phi$.

Límite inclinado Límite de grano de ángulo pequeño compuesto de un arreglo de dislocaciones de arista.

Límite de grano Defecto de superficie que representa el límite entre dos granos. El cristal tiene una orientación distinta en cualquier lado del límite de grano.

Límite de grano de ángulo pequeño Arreglo de dislocaciones que ocasiona un pequeño error de orientación del cristal a través de la superficie de la imperfección.

Límite de macla Defecto de superficie a través del cual hay una desorientación de imagen especular de la estructura cristalina. Los límites de macla también pueden moverse y ocasionar la deformación del material.

Límite elástico Nivel de esfuerzo sobre el cual un material comienza a mostrar una deformación permanente.

Límite helicoidal Límite de grano de ángulo pequeño compuesto de un arreglo de dislocaciones helicoidales.

Línea de deslizamiento Línea visible producida en la superficie de un material metálico por la presencia de varios miles de dislocaciones.

Metalografía Preparación de una muestra metálica de un material puliéndolo y lijándolo de tal manera que la estructura pueda examinarse utilizando un microscopio.

Microscopio electrónico de transmisión (MET) Instrumento que, al pasar un haz de electrones

a través de un material, puede detectar características estructurales microscópicas.

Notación de Kröger-Vink Sistema utilizado para indicar los defectos de punto en los materiales. El cuerpo principal de la notación indica el tipo de defecto o el elemento involucrado. El subíndice indica la localización del defecto de punto y el superíndice indica la carga efectiva positiva (·) o negativa (').

Número ASTM de tamaño del grano [n] Medida del tamaño de los granos en un material cristalino obtenido contando el número de granos por pulgada cuadrada a una magnificación de 100.

Plano de deslizamiento Plano recorrido por la línea de una dislocación durante el deslizamiento. Por lo general, un plano de deslizamiento es un plano compacto, si hay alguno en la estructura cristalina.

Poros de ataque químico Orificios creados en localizaciones donde las dislocaciones coinciden con la superficie. Se utilizan para examinar la presencia y la densidad de las dislocaciones.

Ranurado térmico Técnica utilizada para observar las microestructuras en los materiales cerámicos, involucra el calentamiento de una muestra pulida a una temperatura ligeramente debajo de la temperatura de sinterización durante un periodo corto.

Reacciones químicas del defecto Reacciones escritas utilizando la notación de Kröger-Vink para describir la química del defecto. Las reacciones deben escribirse de tal manera que la masa y las cargas eléctricas estén balanceadas y se conserve la estequiometría de los sitios. La existencia de los defectos pronosticados por tales reacciones necesita verificarse de manera experimental.

Recocido Tratamiento térmico que por lo general involucra calentar un material metálico a una temperatura alta durante un periodo extenso para disminuir la densidad de las dislocaciones y por tanto impartir ductilidad.

Sinterización Proceso para la formación de una masa densa por medio del calentamiento de polvos compactados.

Sistema de deslizamiento Combinación del plano y la dirección del deslizamiento.

Vacancia Átomo o ion ausente en su sitio cristalográfico regular.

Vector de Burgers La dirección y la distancia que una dislocación se mueve en cada etapa, también conocido como vector de deslizamiento.

Problemas

Sección 4-1 Defectos puntuales

- 4-1** El oro tiene 5.82×10^8 vacancias/cm³ en equilibrio a 300 K. ¿Qué fracción de los sitios atómicos está vacante a 600 K?
- 4-2** Calcule el número de vacancias por cm³ esperado en el cobre a 1080 °C (justo debajo de la temperatura de fusión). La energía para la formación de vacancias es de 20 000 cal/mol.
- 4-3** La fracción de los puntos de red ocupados por vacancias en el aluminio sólido a 660 °C es de 10^{-3} . ¿Cuál es la energía requerida para crear vacancias en el aluminio?
- 4-4** La densidad de una muestra de paladio CCCa es de 11.98 g/cm³ y su parámetro de red es de 3.8902 Å. Calcule
- la fracción de los puntos de red que contienen vacancias y
 - el número total de vacancias en un centímetro cúbico del Pd.
- 4-5** La densidad de una muestra de berilio CH es de 1.844 g/cm³ y los parámetros de red son $a_0 = 0.22858$ nm y $c_0 = 0.35842$ nm. Calcule

- la fracción de los puntos de red que contienen vacancias y
- el número total de vacancias en un centímetro cúbico.

- 4-6** El litio CCCu tiene un parámetro de red de 3.5089×10^{-8} cm y contiene una vacancia por 200 celdas unitarias. Calcule

- el número de vacancias por centímetro cúbico y
- la densidad del Li.

- 4-7** El plomo CCCa tiene un parámetro de red de 0.4949 nm y contiene una vacancia por 500 átomos de Pb. Calcule

- la densidad y
- el número de vacancias por gramo de Pb.

- 4-8** El Cu y el Ni forman una solución sólida sustitucional. Esto significa que la estructura cristalina de una aleación de Cu-Ni consiste en átomos de Ni que sustituyen los átomos de Cu en las posiciones atómicas regulares de la estructura CCCa. Para una aleación de 30% en peso Cu-Ni. ¿Qué fracción de los sitios atómicos ocupa el Ni?

- 4-9** Se produce una aleación de niobio introduciendo átomos sustitucionales de tungsteno en la estructura CCCu; con el tiempo se produce una aleación que tiene un parámetro de red de 0.32554 nm y una densidad de 11.95 g/cm^3 . Calcule la fracción de los átomos en la aleación que son de tungsteno.
- 4-10** Se introducen átomos de estaño en un cristal de cobre CCCu, lo que produce una aleación con un parámetro de red de $3.7589 \times 10^{-8} \text{ cm}$ y una densidad de 8.772 g/cm^3 . Calcule el porcentaje atómico del estaño presente en la aleación.
- 4-11** Se reemplaza con tantalio un porcentaje atómico de 7.5 de los átomos de cromo en su cristal CCCu. La difracción de rayos x muestra que el parámetro de red es de 0.29158 nm . Calcule la densidad de la aleación.
- 4-12** Suponga que se introduce un átomo de carbono por cada 100 átomos de hierro en una posición intersticial en el hierro CCCu, lo que da un parámetro de red de 0.2867 nm . Para este acero, encuentre la densidad y el factor de empaquetamiento.
- 4-13** La densidad del hierro CCCu es de 7.882 g/cm^3 y el parámetro de red es de 0.2866 nm cuando se introducen átomos de hidrógeno en las posiciones intersticiales. Calcule
- la fracción atómica de los átomos de hidrógeno y
 - el número de celdas unitarias en promedio que contienen átomos de hidrógeno.

Sección 4-2 Otros defectos puntuales

- 4-14** Suponga que se presenta un defecto de Schottky en cada décima celda unitaria de MgO. El MgO tiene la estructura cristalina del cloruro de sodio y un parámetro de red de 0.396 nm . Calcule
- el número de vacancias de los aniones por cm^3 y
 - la densidad de la cerámica.
- 4-15** El ZnS tiene la estructura de la blenda de zinc. Si la densidad es de 3.02 g/cm^3 y el parámetro de red es de 0.59583 nm , determine el número de defectos de Schottky
- por celda unitaria y
 - por centímetro cúbico.
- 4-16** Suponga que se introducen los siguientes defectos puntuales.
- Iones Mg^{2+} que sustituyen los iones itrio en el Y_2O_3 ,

- Iones Fe^{3+} que sustituyen los iones magnesio en el MgO ,
- Iones Li^{1+} que sustituyen los iones magnesio en el MgO y
- Iones Fe^{2+} que reemplazan los iones sodio en el NaCl .

¿Qué otros cambios en cada estructura podrían ser necesarios para conservar un balance de la carga? Explique.

- 4-17** Escriba la ecuación química del defecto para la introducción del SrTiO_3 en el BaTiO_3 utilizando la notación de Kröger-Vink.

Sección 4-3 Dislocaciones

- 4-18** Dibuje un circuito de Burgers alrededor de las dislocaciones mostradas en la figura 4-21. Indique de manera clara el vector de Burgers que encuentra. ¿Qué tipo de dislocación es ésta? ¿En qué dirección se moverá la dislocación debido al esfuerzo cortante aplicado τ ? Referencie sus respuestas a los ejes coordenados mostrados.

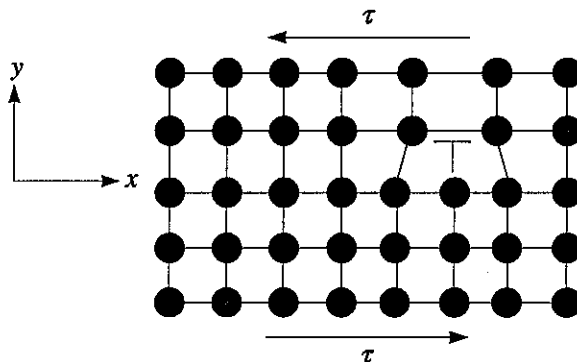


Figura 4-21 Diagrama esquemático de una dislocación para el problema 4-18.

- 4-19** ¿Cuáles son los índices de Miller de las direcciones del deslizamiento:
- en el plano (111) en una celda unitaria CCCa?
 - en el plano (011) en una celda unitaria CCCu?
- 4-20** ¿Cuáles son los índices de Miller de los planos del deslizamiento en las celdas unitarias CCCa que incluyen la dirección del deslizamiento $[101]$?
- 4-21** ¿Cuáles son los índices de Miller de los planos del deslizamiento $\{110\}$ en las celdas unitarias CCCu que incluyen la dirección del deslizamiento $[111]$?

- 4-22** Calcule la longitud del vector de Burgers en los siguientes materiales:
- niobio CCCu,
 - plata CCCa y
 - silicio cúbico del diamante.
- 4-23** Determine el espaciado interplanar y la longitud del vector de Burgers para el deslizamiento en los sistemas de deslizamiento esperados en el aluminio CCCa. Repita, suponiendo que el sistema de deslizamiento es un plano (110) y una dirección $[1\bar{1}1]$. ¿Cuál es la razón entre los esfuerzos cortantes requeridos para el deslizamiento para los dos sistemas? Suponga que $k = 2$ en la ecuación 4-2.
- 4-24** Determine el espaciado interplanar y la longitud del vector de Burgers para el deslizamiento en el sistema de deslizamiento (110)/ $[1\bar{1}1]$ en el tantalio CCCu. Repita, suponiendo que el sistema de deslizamiento es un sistema (111)/ $[1\bar{1}0]$. ¿Cuál es la razón entre los esfuerzos cortantes requeridos para el deslizamiento para los dos sistemas? Suponga que $k = 2$ en la ecuación 4-2.
- 4-25** La estructura cristalina en la figura 4-22 contiene dos dislocaciones A y B. Si se le aplica un esfuerzo cortante al cristal como se muestra, ¿qué le sucederá a las dislocaciones A y B?

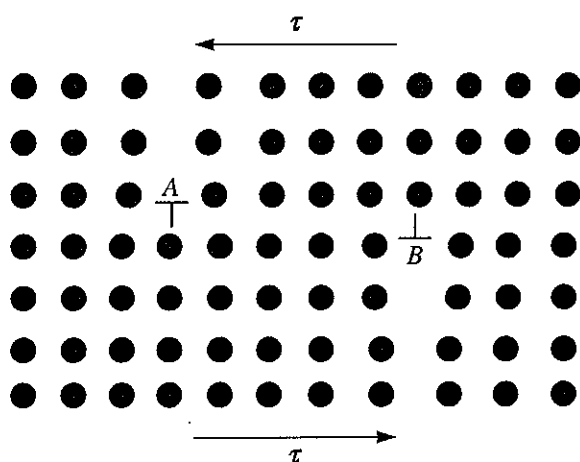


Figura 4-22 Diagrama esquemático de dos dislocaciones para el problema 4-25.

- 4-26** ¿Los materiales cerámicos y poliméricos pueden contener dislocaciones?
- 4-27** ¿Por qué son quebradizos los materiales cerámicos?

Sección 4-4 Importancia de las dislocaciones

- 4-28** ¿Qué significan los términos deformación plástica y elástica?
- 4-29** ¿Por qué la resistencia teórica de los metales es mucho mayor que la observada de manera experimental?
- 4-30** ¿Cuántos gramos de aluminio, con una densidad de dislocación de 10^{10} cm/cm³, se requieren para dar una longitud de dislocación total que se estiraría de la ciudad de Nueva York a Los Ángeles (3000 millas)?
- 4-31** La distancia de la Tierra a la Luna es de 240 000 millas. Si ésta fuera la longitud total de una dislocación en un centímetro cúbico de un material, ¿cuál sería la densidad de las dislocaciones? Compare sus respuestas con las densidades de las dislocaciones comunes para los metales.
- 4-32** ¿Por qué los metales se comportarían como materiales quebradizos sin dislocaciones?
- 4-33** ¿Por qué las dislocaciones desempeñan una función importante en el control de las propiedades mecánicas de los materiales metálicos y sin embargo no desempeñan una función en la determinación de las propiedades mecánicas de los vidrios?
- 4-34** Suponga que le gustaría introducir un átomo intersticial o sustitucional grande en un cristal cerca de una dislocación. ¿El átomo cabría con mayor facilidad por encima o por debajo de la línea de dislocación mostrada en la figura 4-7c)? Explique.

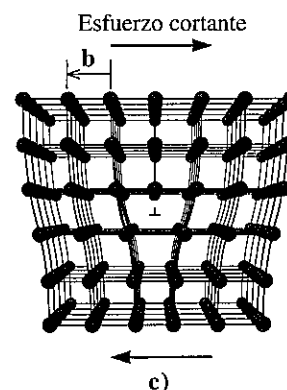


Figura 4-7c) (Repetida para el problema 4-34).

- 4-35** Compare las razones c/a para los siguientes metales CH, determine el proceso de deslizamiento probable en cada uno y calcule el

esfuerzo cortante resuelto crítico aproximado. Explique (véase la información en el apéndice A).

- a) zinc
- b) magnesio
- c) titanio
- d) zirconio
- e) renio
- f) berilio

Sección 4-5 Ley de Schmid

4-36 Un monocristal de un metal CCCa está orientado de tal manera que la dirección [001] es paralela a un esfuerzo aplicado de 5000 psi. Calcule el esfuerzo cortante resuelto que actúa sobre el plano del deslizamiento (111) en las direcciones de deslizamiento $[\bar{1}10]$, $[0\bar{1}1]$ y $[10\bar{1}]$. ¿Cuál(es) sistema(s) de deslizamiento se volverá(n) activo(s) primero?

4-37 Un monocristal de un metal CCCu está orientado de tal manera que la dirección [001] es paralela al esfuerzo aplicado. Si la tensión cortante resuelta crítica requerida para el deslizamiento es de 12 000 psi, calcule la magnitud del esfuerzo aplicado requerido para provocar que inicie el deslizamiento en la dirección $[1\bar{1}1]$ en los planos de deslizamiento (110), (011) y $(10\bar{1})$.

4-38 Un cristal sencillo de plata está orientado de tal manera que el plano de deslizamiento (111) es perpendicular a un esfuerzo aplicado de 50 MPa. Liste los sistemas de deslizamiento compuestos de planos compactos y direcciones que pueden activarse debido a esta tensión aplicada.

Sección 4-6 Influencia de la estructura cristalina

4-39 ¿Por qué son dúctiles el cobre monocristalino y el policristalino, sin embargo, el zinc monocristalino, pero no el policristalino, puede exhibir una ductilidad considerable?

4-40 ¿Por qué el deslizamiento cruzado en los metales CCCu y CCCa es más sencillo que en los metales CH? ¿Cómo influye esto en la ductilidad de los metales CCCu, CCCa y CH?

4-41 Ordene los siguientes metales en el orden esperado de ductilidad incremental: Cu, Ti y Fe.

Sección 4-7 Defectos superficiales

4-42 La resistencia del titanio es 65 000 psi cuando el tamaño de grano es de 17×10^{-6} m y de 82 000 psi cuando el tamaño de grano es de 0.8×10^{-6} m. Determine

- a) las constantes en la ecuación de Hall-Petch y

- b) la resistencia del titanio cuando se reduce el tamaño de grano a 0.2×10^{-6} m.

4-43 Una aleación de cobre-zinc tiene las siguientes propiedades

Diámetro del grano (mm)	Resistencia (MPa)
0.015	170 MPa
0.025	158 MPa
0.035	151 MPa
0.050	145 MPa

Determine

- a) las constantes en la ecuación de Hall-Petch y
- b) el tamaño de grano requerido para obtener una resistencia de 200 MPa.

4-44 Para un número del tamaño de grano ASTM de 8, calcule el número de granos por pulgada cuadrada

- a) a una magnificación de 100 y
- b) sin ninguna magnificación.

4-45 Determine el número ASTM del tamaño de grano si se observan 20 granos/pulg cuadrada a una magnificación de 400.

4-46 Determine el número ASTM del tamaño de grano si se observan 25 granos/pulg cuadrada a una magnificación de 50.

4-47 Determine el número ASTM del tamaño de grano para los materiales en las figuras 4-17 y 4-23.

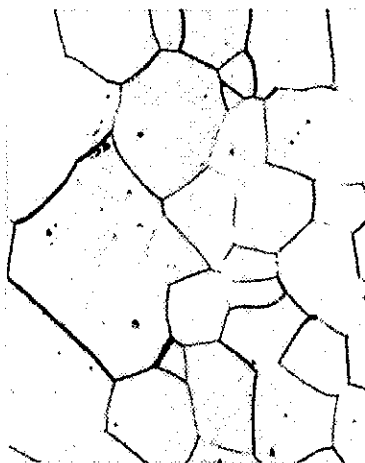


Figura 4-17 (Repetida para el problema 4-47.) Microestructura del paladio (100X). (Del ASM Handbook, Vol. 9, Metallography and Microstructure (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073.)

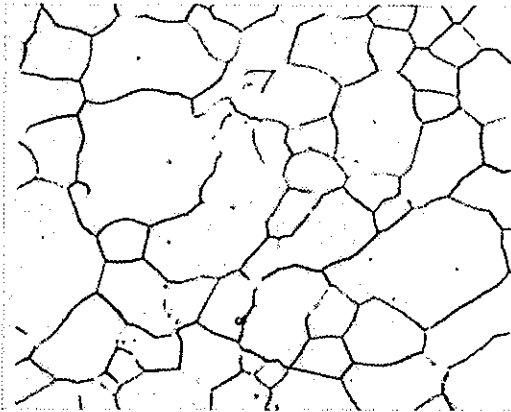


Figura 4-23 Microestructura del hierro. (Del ASM Handbook, Vol. 9, Metallography and Microstructure (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073.)

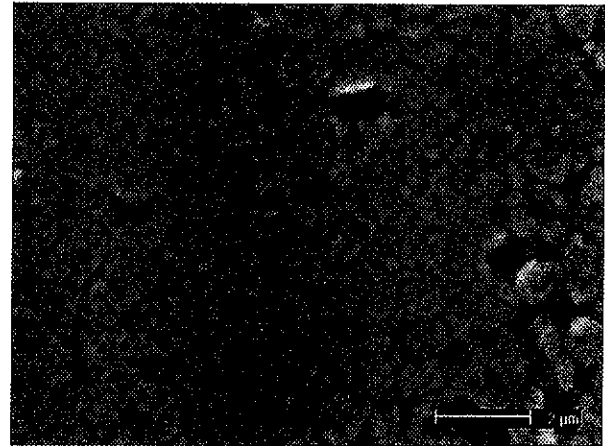


Figura 4-25 Microestructura de una cerámica de alúmina. (Cortesía de los doctores Richard McAfee e Ian Nettleship.)

4-48 Ciertas cerámicas con propiedades dieléctricas especiales se utilizan en los sistemas de comunicación inalámbrica. El tantalato de bario magnesio (BMT) y el tantalato de bario zinc (BZT) son ejemplos de tales materiales. Determine el número ASTM del tamaño de grano para la microestructura mostrada en la figura 4-24 de una cerámica de tantalato de bario magnesio (BMT).

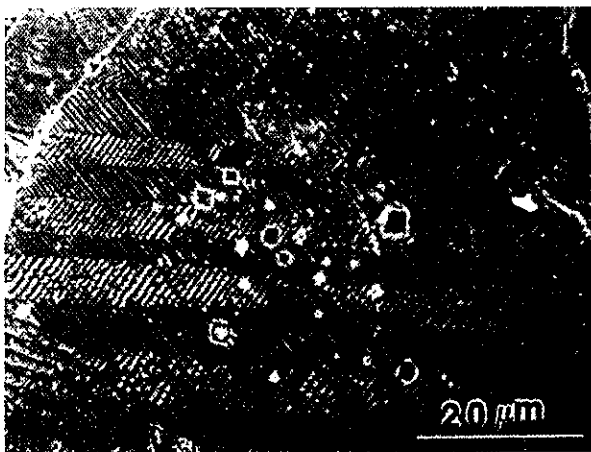


Figura 4-24 Microestructura de una cerámica de tantalato de bario magnesio (BMT). (Cortesía de H. Shivey.)

4-49 La alúmina es el material cerámico más ampliamente utilizado. Determine el número ASTM del tamaño de grano para la muestra de alúmina policristalina mostrada en la figura 4-25.

4-50 El ángulo θ de un límite inclinado está dado por $\sin(\theta/2) = b/(2D)$. (Véase la figura 4-18.) Verifique la exactitud de esta ecuación.

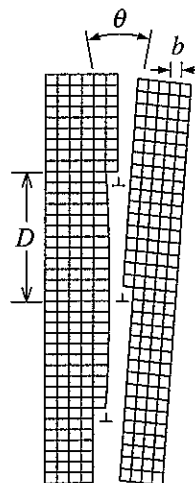


Figura 4-18 (Repetida para los problemas 4-50, 4-51 y 4-52.) El límite de los granos de ángulo pequeño se produce por medio de un arreglo de las dislocaciones, que ocasiona un desajuste angular θ entre las redes en cualquier lado del límite.

4-51 Calcule el ángulo θ de un límite de grano de ángulo pequeño en el aluminio CCCa cuando las dislocaciones están separadas 5000 Å. (Véase la figura 4-18 y la ecuación en el problema 4-50.)

4-52 Para el hierro CCCu, calcule la distancia promedio entre las dislocaciones en un límite de grano de ángulo pequeño inclinado 0.50°. (Véase la figura 4-18.)

4-53 ¿Por qué un monocristal de un superconductor cerámico es capaz de transportar mucha más corriente eléctrica por unidad de área que

un superconductor cerámico policristalino de la misma composición?

Sección 4-8 Importancia de los defectos

- 4-54** ¿Qué hace que el acero al carbono no aleado sea más duro que el hierro puro?
- 4-55** ¿Por qué la joyería se hace de oro o plata aleados con cobre?
- 4-56** ¿Por qué se prefiere utilizar cristales semiconductores que contienen un número de dislocaciones lo más pequeño posible?
- 4-57** ¿Por qué se utilizan aleaciones en vez de metales puros en las aplicaciones estructurales (por ejemplo, el acero para puentes y edificios o las aleaciones de aluminio para aviones)?
- 4-58** ¿Las dislocaciones controlan la resistencia de un vidrio de silicato? Explique.
- 4-59** ¿Qué significa el término endurecimiento por deformación?
- 4-60** ¿Con cuál mecanismo de endurecimiento está relacionada la ecuación de Hall-Petch?
- 4-61** Se endurece cobre puro por medio de la adición de una pequeña concentración de Be. ¿Con cuál mecanismo de endurecimiento se relaciona esto?



Problemas de diseño

- 4-62** Se espera que la densidad del aluminio puro calculada a partir de la información cristalográfica sea de 2.69955 g/cm^3 .
- Diseñe una aleación de aluminio que tenga una densidad de 2.6450 g/cm^3 .
 - Diseñe una aleación de aluminio que tenga una densidad de 2.7450 g/cm^3 .
- 4-63** Desea utilizar una placa metálica con buena soldabilidad. Durante el proceso de soldado, se calienta el metal próximo a la soldadura casi a la temperatura de fusión y, dependiendo de los parámetros de soldado, puede permanecer caliente durante algún tiempo. Diseñe una aleación que minimice la pérdida de resistencia en esta "zona afectada por el calor" durante el proceso de soldado.
- 4-64** Se necesita un material que sea ópticamente transparente pero eléctricamente conductor. Tales materiales se utilizan para pantallas táctiles. ¿Qué tipo de materiales pueden utilizarse para esta aplicación? (Sugerencia: Piense

acerca de los recubrimientos de los materiales que pueden proveer conductividad electrónica o iónica; el sustrato debe ser transparente para esta aplicación.)



Problemas de cómputo

- 4-65** *Concentraciones de vacancias y su dependencia en la temperatura.* Escriba un programa de cómputo que le proveerá a un usuario la concentración de equilibrio de las vacancias en un elemento metálico como una función de la temperatura. El usuario debe especificar un intervalo de temperaturas significativo y válido (por ejemplo, de 100 a 1200 K para el cobre). Suponga que la estructura cristalina especificada originalmente es válida para este intervalo de temperatura. Pida al usuario que introduzca la energía de activación para la formación de un mol de las vacancias (Q_v). El programa debe pedirle al usuario que introduzca la densidad del elemento y la estructura cristalina (CCCa, CCCu, etc.). Puede utilizar variables como caracteres para detectar el tipo de estructuras cristalinas (por ejemplo, "F" o "f" para la CCCa, "B" o "b" para la CCCu, etc.). Asegúrese de poner atención a las unidades correctas para la temperatura, densidad, etc. El programa debe preguntarle al usuario si el intervalo de temperatura que ha proveído está en °C, °F o K y convertir las temperaturas de manera apropiada a K antes de que se realice algún cálculo. El programa debe emplear esta información para establecer el número de átomos por unidad de volumen y proveer una salida para este valor. El programa debe calcular la concentración de equilibrio de las vacancias a distintas temperaturas. La primera temperatura será la temperatura mínima especificada y entonces la temperatura debe incrementarse en 100 K u otro incremento conveniente. Puede usar cualquier software gráfico para trazar la información que muestre la concentración de equilibrio de las vacancias como una función de la temperatura. Piense acerca de qué escalas se utilizarán para mostrar mejor los resultados.
- 4-66** *Ecuación de Hall-Petch.* Escriba un programa de cómputo que le pida al usuario introducir dos conjuntos de valores de σ_y y del tamaño de grano (d) para un material metá-

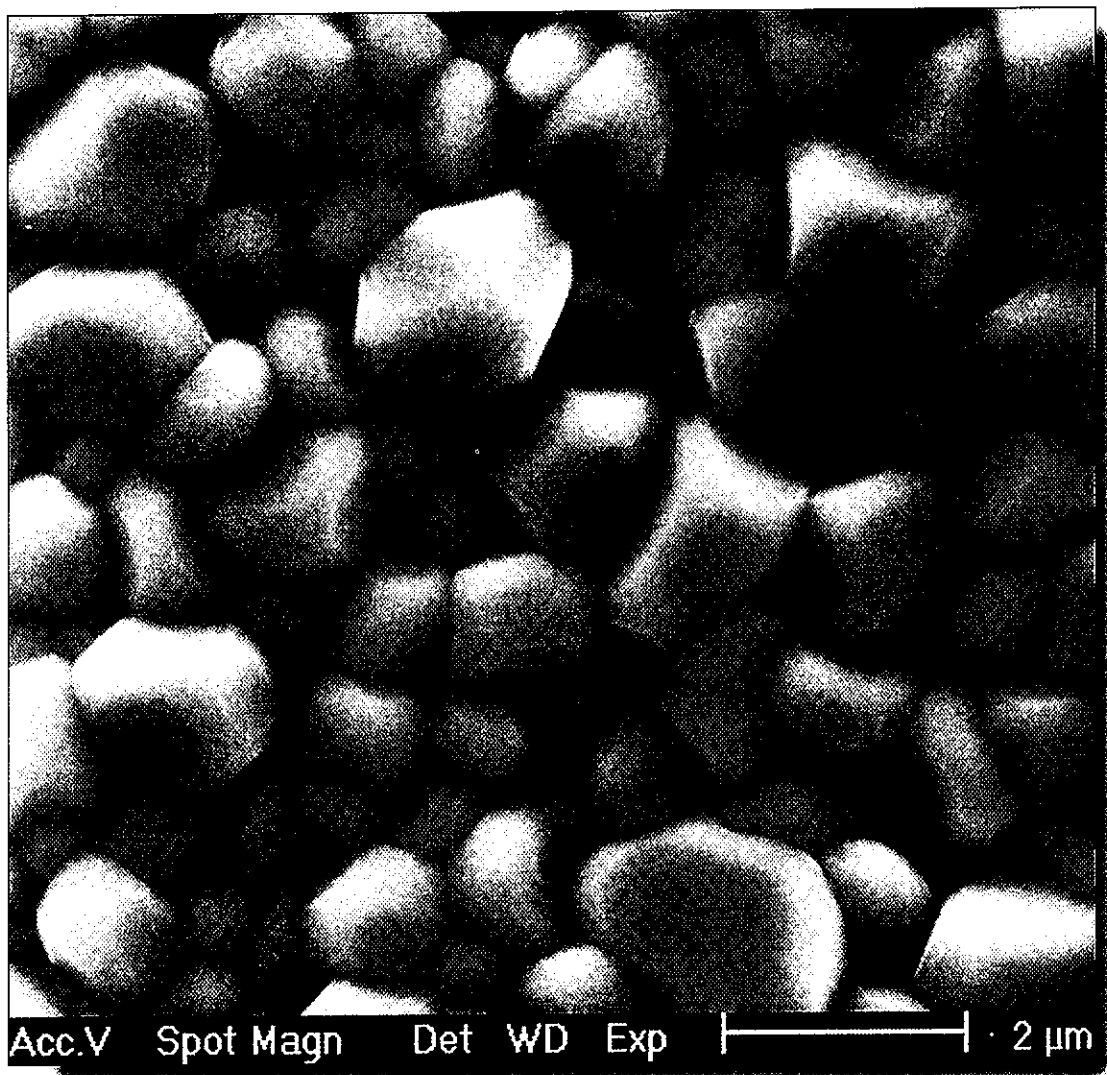
lico. El programa debe utilizar la información para calcular e imprimir la ecuación de Hall-Petch. El programa debe pedirle al usuario que introduzca otro valor del tamaño de grano y calcular el límite elástico o viceversa.

- 4-67** *Calculador del número ASTM del tamaño de grano.* Escriba un programa de cómputo que le pida al usuario introducir la magnificación de una micrografía de la muestra para la que se está calculando el número ASTM. El programa debe pedirle al usuario el número de granos contados y el área (en pulgadas cuadradas) a partir de la cual se contaron estos granos. El programa debe calcular el número

ASTM, tomando en consideración el hecho de que la magnificación de la micrografía no es de 100 y el área puede no haber sido una pulgada cuadrada.

Knovel® Problemas

- K4-1** Describa el problema asociado con las impurezas metálicas en los dispositivos de silicio.
- K4-2** ¿Cuáles son los procesos involucrados en la eliminación de las impurezas metálicas de los dispositivos de silicio por medio de la absorción metálica?



Microestructura de una cerámica sinterizada de tantalato de bario y magnesio (BMT). Este material cerámico es útil en la fabricación de componentes electrónicos utilizados en las comunicaciones inalámbricas. El proceso de sinterización es generado por la difusión de los átomos o iones. (Cortesía de H. Shivey.)

Movimientos de átomos e iones en los materiales

¿Se ha preguntado alguna vez?

- Si el aluminio se oxida con mayor facilidad que el hierro, ¿entonces por qué se dice que el aluminio por lo general no se "corroe"?
- ¿Qué tipo de plástico se utiliza para fabricar ciertas botellas de bebidas carbonatadas?
- ¿Cómo se endurecen las superficies de ciertos aceros?
- ¿Por qué se revisten las fibras ópticas utilizando un recubrimiento polimérico?
- ¿Quién inventó los primeros lentes de contacto?
- ¿Cómo falla un filamento de tungsteno en una bombilla eléctrica?

En el capítulo 4 se aprendió que los arreglos atómicos y iónicos en los materiales nunca son perfectos. También se vio que la mayoría de los materiales de ingeniería no son elementos puros; son aleaciones o mezclas de distintos elementos o compuestos. Los distintos tipos de átomos o iones por lo regular se "difunden", o se mueven dentro del material, por lo que se minimizan las diferencias en sus concentraciones. La **difusión** se refiere a un flujo neto observable de átomos u otras especies. Depende del gradiente de la concentración y la temperatura. Al igual que el agua fluye de una montaña hacia el mar para minimizar su energía potencial gravitacional, los átomos y iones tienen una tendencia a moverse de manera predecible para eliminar las diferencias en las concentraciones y producir composiciones homogéneas que hacen al material más estable de manera termodinámica.

En este capítulo aprenderá que la temperatura influye en la cinética de la difusión y que la diferencia en las concentraciones contribuye al flujo neto total de la difusión de las especies. El objetivo de este capítulo es examinar los principios y las aplicaciones de la difusión en los materiales. Se ilustrará el concepto de difusión a través de ejemplos de varias tecnologías del mundo real que dependen de la difusión de átomos, iones o moléculas.

Se presentará una sinopsis de las leyes de Fick que describen de manera cuantitativa el proceso de difusión. También se verá cómo la accesibilidad relativa de distintas estructuras cristalinas y el tamaño de los átomos o iones, la temperatura y la concentración de las especies que se están difundiendo afectan la velocidad a la que ocurre la difusión. Se explicarán ejemplos específicos de cómo se emplea la difusión en la síntesis y el procesamiento de materiales avanzados así como también en la fabricación de componentes utilizando materiales avanzados.

5-1 Aplicaciones de la difusión

Difusión La difusión se refiere al flujo neto de cualquier especie, como iones, átomos, electrones, orificios (capítulo 19) y moléculas. La magnitud de este flujo depende del gradiente de la concentración y la temperatura. El proceso de difusión es de gran importancia para una gran variedad de tecnologías importantes actuales. En las tecnologías del procesamiento de materiales es clave el control sobre la difusión de los átomos, iones, moléculas u otras especies. Existen cientos de aplicaciones y tecnologías que dependen del incremento o limitación de la difusión. Los siguientes son unos cuantos ejemplos.

Carburación para el endurecimiento de la superficie de los aceros

Se desea endurecer una superficie, tal como el diente de un engrane; sin embargo, no se desea endurecer todo el engrane. Se puede utilizar el proceso de carburación para incrementar la dureza de la superficie. En la carburación, se difunde una fuente de carbono, como un polvo de grafito o una fase gaseosa que contenga carbono, en los componentes de acero como los engranes (figura 5-1). En capítulos posteriores aprenderá como el incremento de la concentración de carbono en la superficie del acero aumenta la dureza del acero. De manera similar a la introducción de carbono, también se puede utilizar un proceso conocido como **nitruración**, en el que se introduce nitrógeno en la superficie de un material metálico. La difusión también desempeña una función muy importante en el control de las transformaciones de fase necesarias para el tratamiento térmico de metales y aleaciones, el procesamiento de cerámicas y la solidificación y unión de materiales (véase la sección 5-9).

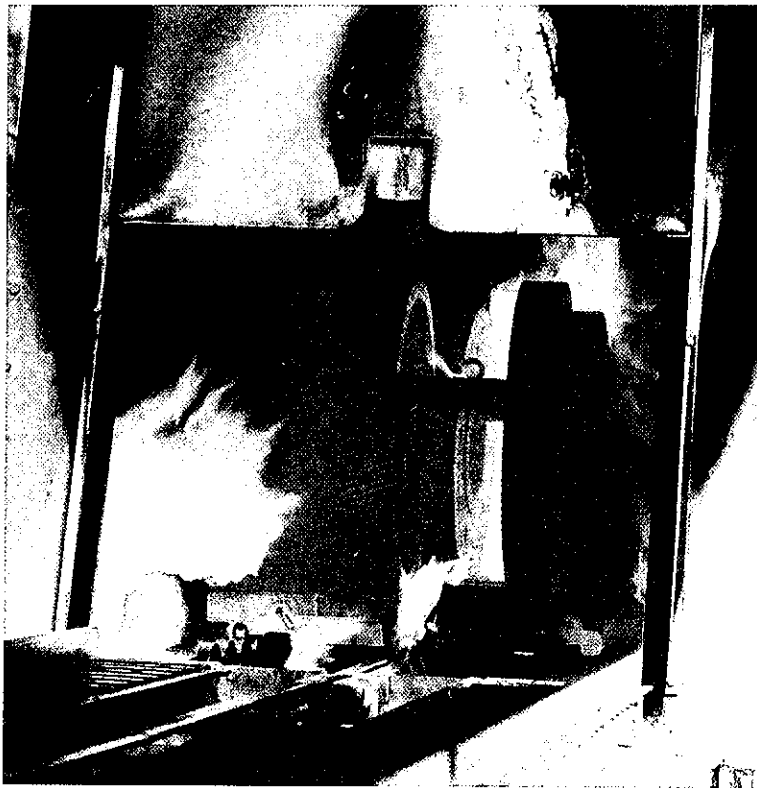


Figura 5-1 Horno para el tratamiento térmico del acero que utiliza el proceso de carburación. (Cortesía del Cincinnati Steel Treating.)

Difusión de dopantes para dispositivos semiconductores

Toda la industria microelectrónica, como la conocemos en la actualidad, no existiría si no se tuviera una buena comprensión de la difusión de los distintos átomos en el silicio u otros semiconductores. La creación de la *unión p-n* (capítulo 19) involucra la difusión de átomos dopantes, como el fósforo (P), arsénico (As), antimonio (Sb), boro (B), aluminio (Al), etc., en regiones definidas de manera precisa de las obleas de silicio. Algunas de estas regiones son tan pequeñas que se miden mejor en nanómetros. Una *unión p-n* es una región del semiconductor, un lado de la cual está dopada con dopantes del tipo *n* (por ejemplo, As en Si) y el otro lado está dopado con dopantes del tipo *p* (por ejemplo, B en Si).

Cerámicas conductoras

En general, las cerámicas policristalinas tienden a ser buenas aislantes de la electricidad. La difusión de iones, electrones u orificios también desempeña una función importante en la conductividad eléctrica de muchas **cerámicas conductoras**, como la zirconia (ZrO_2) parcial o completamente estabilizada, o el óxido de indio y estaño (también conocido como ITO). El óxido de litio y cobalto (LiCoO_2) es un ejemplo de un material iónicamente conductor que se emplea en las baterías de ion litio. Estos materiales iónicamente conductores se utilizan para productos tales como sensores de oxígeno en automóviles, pantallas táctiles, celdas de combustible y baterías. La habilidad de los iones de difundirse y proveer una vía para la conducción eléctrica desempeña una función importante que permite estas aplicaciones.

Fabricación de botellas de bebidas de plástico

La ocurrencia de la difusión puede no ser siempre benéfica. En algunas aplicaciones se puede desear limitar la ocurrencia de la difusión para ciertas especies. Por ejemplo, en la creación de ciertas botellas de plástico, debe minimizarse la difusión del dióxido de carbono (CO_2). ¡Ésta es una de las razones principales de por qué se utiliza tereftalato de polietileno (PET) para fabricar botellas que aseguren que las bebidas carbonatadas que lo contienen no perderán su efervescencia durante un periodo razonable!

Oxidación del aluminio

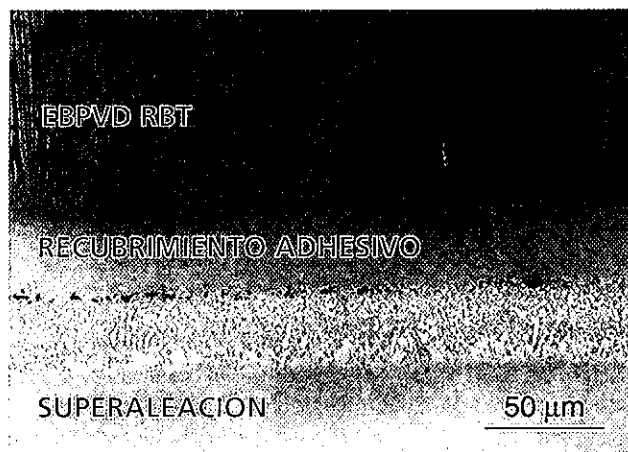
Es probable que haya escuchado o sabido que el aluminio no se "corroe". En realidad, el aluminio se oxida (corroe) con mayor facilidad que el hierro; sin embargo, el óxido de aluminio (Al_2O_3) forma un recubrimiento delgado pero muy protector sobre la superficie del aluminio que previene cualquier otra difusión de oxígeno y que impide la oxidación posterior del aluminio subyacente. El recubrimiento del óxido no tiene color y es delgado y, por tanto, invisible. Ésta es la razón de por qué se piensa que el aluminio no se corroe.

Recubrimientos y películas delgadas

Los recubrimientos y películas delgadas se utilizan con frecuencia para limitar la difusión del vapor de agua, del oxígeno o de otras sustancias químicas.

Recubrimientos de barrera térmica para álabes de turbinas

En un motor de avión algunos de los álabes de la turbina basados en una superaleación de níquel se recubren con óxidos cerámicos como la zirconia estabilizada con itria (YSZ). Estos recubrimientos cerámicos protegen la aleación subyacente de las altas temperaturas; de ahí el nombre de **recubrimientos de barrera térmica** (RBT) (figura 5-2). La difusión del oxígeno a través de estos recubrimientos cerámicos y la oxidación subsecuente de la aleación subyacente desempeña una función principal en la determinación del tiempo de vida y la durabilidad de los álabes de las turbinas. En la figura 5-2 EBPVD significa deposición física del vapor por medio de un haz de electrones. El recubrimiento adherente es una aleación basada en platino o molibdeno. Provee adhesión entre el RBT y el sustrato.

**Figura 5-2**

Recubrimiento de barrera térmica sobre una superaleación basada en níquel. (Cortesía de los doctores F. S. Pettit y G. H. Meier, University of Pittsburgh.)

Fibras ópticas y componentes microelectrónicos

Las fibras ópticas hechas de sílice (SiO_2) se recubren con materiales poliméricos para prevenir la difusión de las moléculas de agua. Esto, a su vez, mejora las propiedades ópticas y mecánicas de las fibras.

Ejemplo 5-1

Difusión de Ar/He y Cu/Ni

Considere una caja que contiene una división impermeable que divide la caja en volúmenes iguales (figura 5-3). En un lado, se tiene gas argón (Ar) puro; en el otro, gas helio (He) puro. Explique qué pasará cuando se abra la división. ¿Qué sucederá si se reemplaza el lado con Ar con un monocristal de Cu y el lado con He con un monocristal de Ni?

SOLUCIÓN

Antes de que se abra la división, un compartimiento no tiene argón y el otro no tiene helio (es decir, existe un gradiente de concentración del Ar y el He). Cuando se abre la división, los átomos de Ar se difundirán hacia el lado con He, y viceversa. Esta difusión continuará hasta que toda la caja tenga una concentración uniforme de ambos gases. También puede haber algún gradiente de las densidades impulsando corrientes o flujos de convección. Si se toman al azar muestras de distintas regiones en la caja después de unas cuantas horas, se encontraría una concentración estadísticamente uniforme de Ar y He. Observe que los átomos de Ar y He continuarán moviéndose en la caja debido a sus energías térmicas; sin embargo, no habrá gradientes de concentración.

Si se abre la división hipotética entre los monocristales de Ni y Cu a temperatura ambiente, se encontrará que, de manera similar a la situación del Ar/He, los gradientes de concentración existen pero la temperatura es tan baja como para

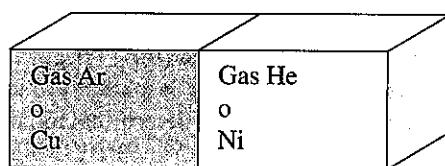
**Figura 5-3**

Ilustración para la difusión de Ar/He y Cu/Ni (para el ejemplo 5-1).

observar cualquier difusión significativa de los átomos de Cu en el monocristal de Ni y viceversa. Éste es un ejemplo de una situación en la que existe un gradiente de concentración; sin embargo, debido a la baja temperatura la cinética para la difusión no es favorable. Sin duda, si se incrementa la temperatura (por decir a 600 °C) y se espera un periodo largo (por ejemplo, ~24 horas), se observaría la difusión de los átomos de Cu en el monocristal de Ni y viceversa. Después de un tiempo muy largo todo el sólido tendrá una concentración uniforme de átomos de Ni y Cu. El nuevo sólido que se forma consiste en átomos de Cu y Ni disueltos por completo entre sí y al material resultante se le nombra "solución sólida", un concepto que se estudiará a mayor detalle en el capítulo 10.

Este ejemplo también ilustra algo que puede saber por intuición. La difusión de los átomos y moléculas ocurre más rápido en vidrios y líquidos que en los sólidos. Como se verá en el capítulo 9 y otros capítulos, la difusión tiene un efecto significativo sobre la evolución de la microestructura durante la solidificación de las aleaciones, el tratamiento térmico de los metales y aleaciones, y el procesamiento de materiales cerámicos.

5-2 Estabilidad de átomos e iones

En el capítulo 4 se mostró que las imperfecciones están presentes y que también pueden introducirse de manera deliberada en un material; sin embargo, estas imperfecciones, de hecho, incluso los átomos o iones en sus posiciones normales en las estructuras cristalinas no son estables o están en reposo. Por el contrario, los átomos o iones poseen energía térmica y se moverán. Por ejemplo, un átomo puede moverse de una localización normal en la estructura cristalina para ocupar una vacancia cercana. Un átomo también puede moverse de un sitio intersticial a otro. Los átomos o iones pueden saltar a través de un límite de grano, ocasionando que el límite de grano se mueva.

La habilidad de los átomos y iones para difundirse aumenta a medida que la temperatura, o energía térmica que poseen los átomos y iones, se incrementa. La velocidad del movimiento de los átomos o iones está relacionada con la temperatura o energía térmica por medio de la *ecuación de Arrhenius*:

$$\text{Velocidad} = c_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (5-1)$$

donde c_0 es una constante, R es la constante de los gases ($1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$), T es la temperatura absoluta (K) y Q es la **energía de activación** (cal/mol) requerida para ocasionar que se mueva un número de Avogadro de átomos o iones. Esta ecuación se deduce a partir de un análisis estadístico de la probabilidad de que los átomos tendrán la energía adicional Q necesaria para ocasionar el movimiento. La velocidad está relacionada con el número de átomos que se mueven.

Se puede reescribir esta ecuación tomando los logaritmos naturales de ambos lados:

$$\ln(\text{velocidad}) = \ln(c_0) - \frac{Q}{RT} \quad (5-2)$$

Si se grafica el $\ln(\text{velocidad})$ de alguna reacción en función de $1/T$ (figura 5-4), la pendiente de la línea será $-Q/R$ y, en consecuencia, puede calcularse Q . La constante c_0 corresponde a la intercepción en $\ln(c_0)$ cuando $1/T$ es cero.

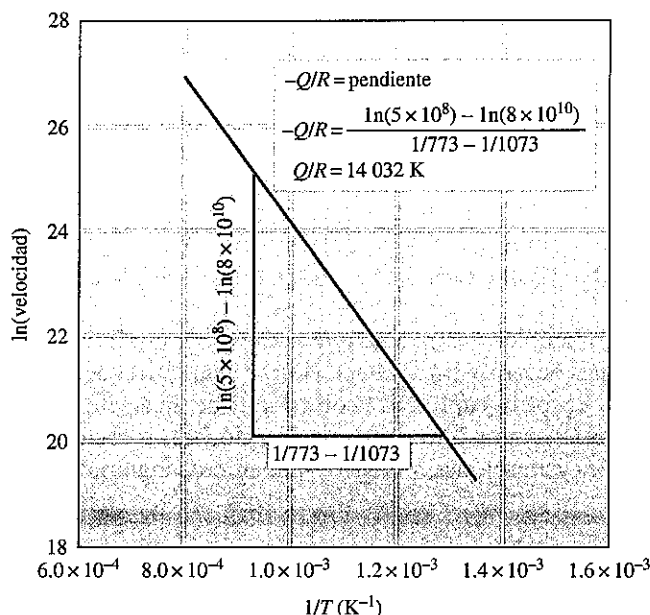


Figura 5-4

La gráfica de Arrhenius del $\ln(\text{velocidad})$ en función de $1/T$ puede utilizarse para determinar la energía de activación para una reacción. La información de esta figura se utiliza en el ejemplo 5-2.

Svante August Arrhenius (1859-1927), químico sueco quien ganó el premio Nobel de Química en 1903 por su investigación sobre la teoría electrolítica de la disociación aplicó esta idea a las velocidades de las reacciones químicas en soluciones acuosas. Su idea básica de la energía de activación y las velocidades de las reacciones químicas como funciones de la temperatura se ha aplicado desde entonces a los procesos de velocidades de difusión y otros.

Ejemplo 5-2

Energía de activación para los átomos intersticiales

Suponga que se encuentra que los átomos intersticiales se mueven de un sitio a otro a las velocidades de 5×10^8 saltos/s a 500°C y de 8×10^{10} saltos/s a 800°C . Calcule la energía de activación Q para el proceso.

SOLUCIÓN

La figura 5-4 representa la información en la gráfica del $\ln(\text{velocidad})$ en función de $1/T$; la pendiente de esta línea, como se calculó en la figura, da $Q/R = 14\,032 \text{ K}$, o $Q = 27\,880 \text{ cal/mol}$. De manera alterna, se podrían escribir dos ecuaciones simultáneas:

$$\begin{aligned} \text{Velocidad}\left(\frac{\text{saltos}}{\text{s}}\right) &= c_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \\ 5 \times 10^8 \left(\frac{\text{saltos}}{\text{s}}\right) &= c_0 \left(\frac{\text{saltos}}{\text{s}}\right) \exp\left[\frac{-Q\left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}}\right)}{\left[1.987\left(\frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right)\right](500 + 273)(\text{K})}\right] \\ &= c_0 \exp(-0.000651Q) \end{aligned}$$

$$8 \times 10^{10} \left(\frac{\text{saltos}}{\text{s}} \right) = c_0 \left(\frac{\text{saltos}}{\text{s}} \right) \exp \left[\frac{-Q \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}} \right)}{\left[1.987 \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right) \right] [(800 + 273)(\text{K})]} \right]$$

$$= c_0 \exp(-0.000469Q)$$

Observe que las temperaturas se convirtieron a K. Dado que

$$c_0 = \frac{5 \times 10^8}{\exp(-0.000651Q)} \left(\frac{\text{saltos}}{\text{s}} \right)$$

entonces

$$8 \times 10^{10} = \frac{(5 \times 10^8) \exp(-0.000469Q)}{\exp(-0.000651Q)}$$

$$160 = \exp[(0.000651 - 0.000469)Q] = \exp(0.000182Q)$$

$$\ln(160) = 5.075 = 0.000182Q$$

$$Q = \frac{5.075}{0.000182} = 27\,880 \text{ cal/mol}$$

5-3

Mecanismos para la difusión

Como se vio en el capítulo 4, en los materiales existen defectos conocidos como vacancias. El desorden que crean las vacancias (es decir, el aumento de entropía) ayuda a minimizar la energía libre y, por tanto, incrementa la estabilidad termodinámica de un material cristalino. En los materiales que contienen vacancias, los átomos se mueven o “saltan” de una posición de red a otra. Este proceso, conocido como **autodifusión**, puede detectarse utilizando trazadores radiactivos. Como ejemplo, suponga que se introduce un isótopo radiactivo de oro (Au^{198}) en la superficie del oro estándar (Au^{197}). Después de un tiempo, los átomos radiactivos se moverían hacia el oro estándar. Con el tiempo, los átomos radiactivos se distribuirán de manera uniforme a lo largo de toda la muestra de oro estándar. Aunque la autodifusión se lleva de manera continua en todos los materiales, su efecto sobre el comportamiento del material por lo general no es significativo.

Interdifusión También se lleva a cabo en los materiales la difusión de átomos distintos (figura 5-5). Considere una hoja de níquel unida a una hoja de cobre. A altas temperaturas, los átomos de níquel se difunden de manera gradual en el cobre y los átomos de cobre migran al níquel. De nuevo, los átomos de níquel y de cobre se distribuirán de manera uniforme con el tiempo. A la difusión de átomos distintos en direcciones diferentes se le conoce como **interdifusión**. Existen dos mecanismos importantes por medio los cuales los átomos o iones pueden difundirse (figura 5-6).

Difusión por vacancia En la autodifusión y en la difusión que involucran átomos sustitucionales, un átomo deja su sitio de red para llenar una vacancia cercana (por tanto creando una nueva vacancia en el sitio de red original). A medida que la difusión conti-

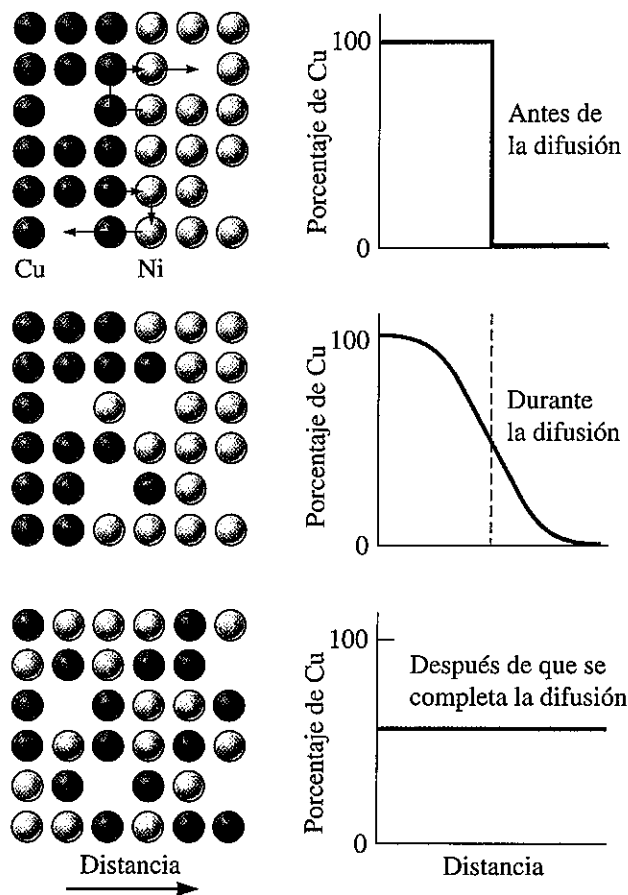


Figura 5-5

Difusión de los átomos de cobre en el níquel. Con el tiempo, los átomos de cobre se distribuyen de manera aleatoria a lo largo del níquel.

núa, se tienen contraflujos de átomos y vacancias, a lo que se le llama **difusión por vacancia**. El número de vacancias, el cual aumenta a medida que incrementa la temperatura, influye en la extensión de la autodifusión y difusión de los átomos sustitucionales.

Difusión intersticial Cuando está presente en la estructura cristalina un átomo o ion intersticial pequeño, el átomo o ion se mueve de un sitio intersticial a otro. No se requieren vacancias para este mecanismo. En parte debido a que hay mucho más sitios intersticiales que vacancias, la **difusión intersticial** se lleva a cabo con mucha mayor facilidad que la difusión por vacancia. Los átomos intersticiales que son relativamente más pequeños se difunden más



Figura 5-6 Mecanismos de difusión en los materiales: a) difusión por vacancia o átomos sustitucionales y b) difusión intersticial.

rápido. En el capítulo 3, se vio que la estructura de muchas cerámicas con enlazamiento iónico puede considerarse como compacta de aniones con cationes en los sitios intersticiales. En estos materiales, los cationes más pequeños con frecuencia se difunden más rápido que los aniones más grandes.

5-4 Energía de activación para la difusión

Un átomo que se está difundiendo debe abrirse camino a través de los átomos que lo rodean para alcanzar su nuevo sitio. Para que esto suceda, debe aplicarse energía con el fin de permitir que el átomo se mueva a su nueva posición, como se muestra de manera esquemática para la difusión por vacancia e intersticial en la figura 5-7. El átomo está al inicio en una localización de baja energía relativamente estable. Para moverse a una nueva localización, el átomo debe superar una barrera de energía. La barrera de energía es la energía de activación Q . La energía térmica suministra a los átomos y iones la energía necesaria para superar esta barrera. Observe que el símbolo Q se utiliza con frecuencia para denotar las energías de activación en distintos procesos (velocidad a la que los átomos saltan, una reacción química, la energía necesaria para producir vacancias, etc.), y se debe tener cuidado de comprender el proceso o fenómeno específico al que se está aplicando el término general para la energía de activación Q , ya que el valor de Q depende del fenómeno en particular.

Por lo general, se requiere menos energía para forzar un átomo intersticial a través de los átomos circundantes; en consecuencia, las energías de activación son menores para la difusión intersticial que para la difusión por vacancia. En la tabla 5-1 se muestran los valores comunes para las energías de activación para la difusión de distintos átomos en diferentes materiales anfitriones. Se utiliza el término **par de difusión** para indicar una combinación de un átomo de un elemento dado (por ejemplo, carbono) que se difunde en un material anfitrión (por ejemplo, Fe CCCu). Una energía de activación baja indica una difusión fácil. En la autodifusión, la energía de activación es igual a la energía necesaria para crear una vacancia y ocasionar el movimiento del átomo. La tabla 5-1 también muestra los valores de D_0 , el término antes del exponente, y la constante c_0 de la ecuación 5-1, cuando el proceso de velocidad es la difusión. Posteriormente se verá que D_0 es el coeficiente de difusión cuando $1/T = 0$.

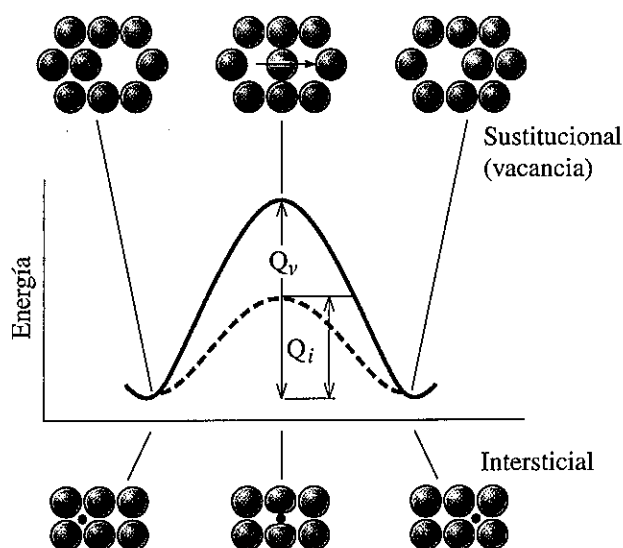


Figura 5-7

Se requiere de una energía de activación Q para forzar átomos entre sí durante la difusión. Por lo general se requiere más energía para un átomo sustitucional que para un átomo intersticial.

TABLA 5-1 ■ Datos de difusión para los materiales seleccionados

Par de difusión	Q (cal/mol)	D_0 (cm ² /s)
Difusión intersticial:		
C en hierro CCCa	32 900	0.23
C en hierro CCCu	20 900	0.011
N en hierro CCCa	34 600	0.0034
N en hierro CCCu	18 300	0.0047
H en hierro CCCa	10 300	0.0063
H en hierro CCCu	3 600	0.0012
Autodifusión (difusión por vacancia):		
Pb en Pb CCCa	25 900	1.27
Al en Al CCCa	32 200	0.10
Cu en Cu CCCa	49 300	0.36
Fe en Fe CCCa	66 700	0.65
Zn en Zn CH	21 800	0.1
Mg en Mg CH	32 200	1.0
Fe en Fe CCCu	58 900	4.1
W en W CCCu	143 300	1.88
Si en Si (covalente)	110 000	1800.0
C en C (covalente)	163 000	5.0
Difusión heterogénea (difusión por vacancia):		
Ni en Cu	57 900	2.3
Cu en Ni	61 500	0.65
Zn en Cu	43 900	0.78
Ni en hierro CCCa	64 000	4.1
Au en Ag	45 500	0.26
Ag en Au	40 200	0.072
Al en Cu	39 500	0.045
Al en Al ₂ O ₃	114 000	28.0
O en Al ₂ O ₃	152 000	1900.0
Mg en MgO	79 000	0.249
O en MgO	82 100	0.000043

Información a partir de varias fuentes, incluyendo Adda, Y. y Philibert, J., La Diffusion dans les Solides, Vol. 2, 1966.

5-5

Velocidad de difusión [primera ley de Fick]

Adolf Eugen Fick (1829-1901) fue el primer científico en proveer una descripción cuantitativa del proceso de difusión. De manera interesante, ¡Fick también fue el primero en experimentar con lentes de contacto en animales y el primero en implantar un lente de contacto en ojos humanos en 1887-1888!

La velocidad a la que los átomos, iones, partículas u otras especies se difunden en un material puede medirse por medio del **flujo J** . Aquí se trata principalmente con la difusión de iones o átomos. El flujo J se define como el número de átomos que pasan a través de un plano de unidad de área por unidad de tiempo (figura 5-8). La **primera ley de Fick** explica el flujo neto de los átomos:

$$J = -D \frac{dc}{dx} \quad (5-3)$$

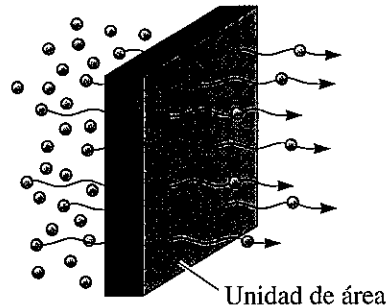


Figura 5-8

El flujo durante la difusión se define como el número de átomos que pasan a través de un plano de unidad de área por unidad de tiempo.

donde J es el flujo, D es la **difusividad** o **coeficiente de difusión** ($\frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$), y dc/dx es el **gradiente de concentración** ($\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}}$). Dependiendo de la situación, la concentración puede expresarse como porcentaje atómico (% at), porcentaje en peso (% pe), porcentaje molar (% mol), fracción atómica o fracción molar. Las unidades del gradiente de concentración y el flujo también cambiarán de manera acorde.

Varios factores afectan el flujo de átomos durante la difusión. Si se tratara con difusión de iones, electrones, orificios, etc., la unidades de J , D y $\frac{dc}{dx}$ reflejarán las especies apropiadas que se están considerando. El signo negativo en la ecuación 5-3 indica que el flujo de la especie que se está difundiendo es de concentraciones mayores a menores, por lo que si el término $\frac{dc}{dx}$ es negativo, J será positivo. La energía térmica asociada con los átomos, iones, etc., ocasiona el movimiento aleatorio de los átomos. A una escala microscópica la fuerza termodinámica impulsora para la difusión es el gradiente de concentración. Se crea un flujo neto o uno observable dependiendo de la temperatura y del gradiente de concentración.

Gradiente de concentración El gradiente de concentración muestra cómo varía la composición del material con la distancia: Δc es la diferencia en la concentración sobre la distancia Δx (figura 5-9). Puede crearse un gradiente de concentración cuando dos materiales de distinta composición se ponen en contacto, cuando un gas o un líquido están en contacto con un material sólido, cuando se producen estructuras sin equilibrio en un material debido al procesamiento y a partir de un anfitrión u otras fuentes.

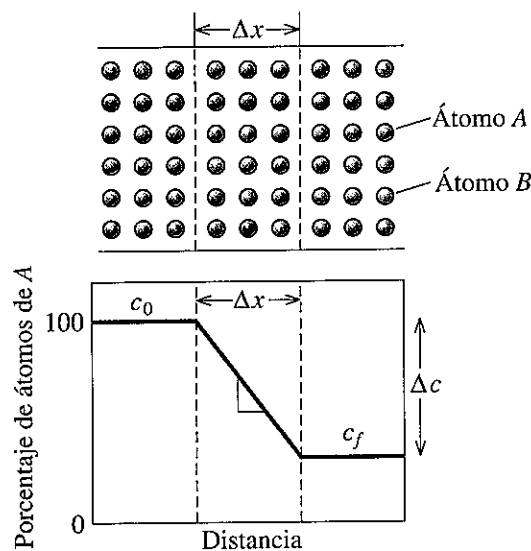


Figura 5-9

Ilustración del gradiente de concentración.

El flujo a una temperatura en particular es constante sólo si el gradiente de concentración también es constante, es decir, las composiciones en cada lado del plano en la figura 5-8 permanecen sin cambios. Sin embargo, en muchos casos prácticos estas composiciones varían a medida que los átomos se redistribuyen y por tanto el flujo también cambia. Con frecuencia, se encuentra que el flujo es inicialmente alto y que disminuye de manera gradual a medida que el gradiente de concentración es reducido por la difusión. Los ejemplos que siguen ilustran los cálculos del flujo y los gradientes de concentración para la difusión de dopantes en semiconductores y cerámicas, pero sólo para el caso de un gradiente de concentración constante. Más adelante en este capítulo se considerará la difusión de estado inestable con la ayuda de la segunda ley de Fick.

Ejemplo 5-3

Dopado de semiconductores

Otra etapa en la fabricación de transistores, los cuales funcionan como conmutadores electrónicos en circuitos integrados, involucra la difusión de átomos impuros en un material semiconductor como el silicio (Si). Suponga que una oblea de silicio de 0.1 cm de grosor, la cual contiene originalmente un átomo de fósforo por cada 10 millones de átomos de silicio, se trata de tal manera que hay 400 átomos de fósforo (P) por cada 10 millones de átomos de Si en la superficie (figura 5-10). Calcule el gradiente de concentración a) en porcentaje atómico/cm y b) en $\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}}$. El parámetro de red del silicio es de 5.4307 Å.

SOLUCIÓN

- a) Primero, se calculan las composiciones inicial y de la superficie en porcentaje atómico:

$$c_i = \frac{1 \text{ átomo de P}}{10^7 \text{ átomos}} \times 100 = 0.00001 \% \text{ at P}$$

$$c_s = \frac{400 \text{ átomos de P}}{10^7 \text{ átomos}} \times 100 = 0.004 \% \text{ at P}$$

$$\frac{\Delta c}{\Delta x} = \frac{0.00001 - 0.004 \% \text{ at P}}{0.1 \text{ cm}} = -0.0399 \frac{\% \text{ at P}}{\text{cm}}$$

- b) Para encontrar el gradiente en términos de $\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}}$, se debe encontrar el volumen de la celda unitaria. La estructura cristalina del Si es la cúbica del diamante (CD). El parámetro de red es de $5.4307 \times 10^{-8} \text{ cm}$. Por tanto,

$$V_{\text{celda}} = (5.4307 \times 10^{-8} \text{ cm})^3 = 1.6 \times 10^{-22} \frac{\text{cm}^3}{\text{celda}}$$

El volumen ocupado por 10^7 átomos de Si, los cuales están arreglados en una estructura CD con 8 átomos/celda, es:

$$V = \left[\frac{10^7 \text{ átomos}}{8 \frac{\text{átomos}}{\text{celda}}} \right] \left[1.6 \times 10^{-22} \left(\frac{\text{cm}^3}{\text{celda}} \right) \right] = 2 \times 10^{-16} \text{ cm}^3$$

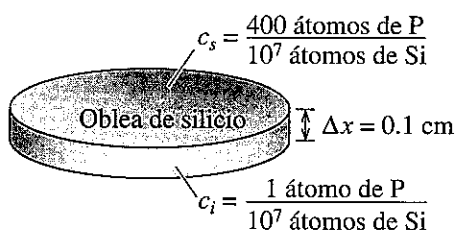


Figura 5-10

Oblea de silicio que muestra la variación en la concentración de los átomos de P (para el ejemplo 5-3).

Las composiciones en átomos/cm³ son:

$$c_i = \frac{1 \text{ átomo de P}}{2 \times 10^{-16} \text{ cm}^3} = 0.005 \times 10^{18} \text{ P} \left(\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$c_s = \frac{400 \text{ átomos de P}}{2 \times 10^{-16} \text{ cm}^3} = 2 \times 10^{18} \text{ P} \left(\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3} \right)$$

Por tanto, el gradiente de composición es

$$\begin{aligned} \frac{\Delta c}{\Delta x} &= \frac{0.005 \times 10^{18} - 2 \times 10^{18} \text{ P} \left(\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3} \right)}{0.1 \text{ cm}} \\ &= -1.995 \times 10^{19} \text{ P} \left(\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}} \right) \end{aligned}$$

Ejemplo 5-4 *Difusión del níquel en el óxido de magnesio (MgO)*

Se deposita una capa de 0.05 cm de óxido de magnesio (MgO) entre capas de níquel (Ni) y tantalio (Ta) para proveer una barrera de difusión que prevenga reacciones entre los dos metales (figura 5-11). A 1400 °C, los iones níquel se difunden a través de la cerámica de MgO al tantalio. Determine el número de iones níquel que pasan a través del MgO por segundo. A 1400 °C, el coeficiente de difusión de los iones níquel en el MgO es de $9 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$ y el parámetro de red del níquel a 1400 °C es de $3.6 \times 10^{-8} \text{ cm}$.

SOLUCIÓN

La composición del níquel en la interfaz Ni/MgO es de 100% Ni, o

$$c_{\text{Ni/MgO}} = \frac{4 \text{ Ni} \frac{\text{átomos}}{\text{celda unitaria}}}{(3.6 \times 10^{-8} \text{ cm})^3} = 8.573 \times 10^{22} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3}$$

La composición del níquel en la interfaz Ta/MgO es de 0% Ni. Por tanto el gradiente de concentración es

$$\frac{\Delta c}{\Delta x} = \frac{0 - 8.573 \times 10^{22} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3}}{0.05 \text{ cm}} = -1.715 \times 10^{24} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}}$$

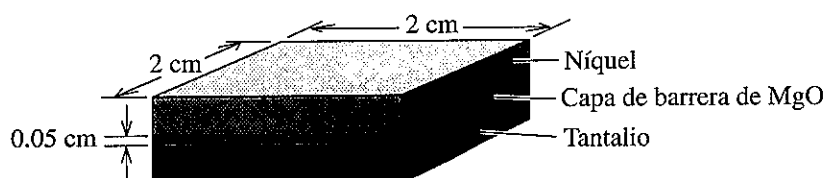


Figura 5-11 Par de difusión (para el ejemplo 5-4).

El flujo de los átomos de níquel a través de la capa de MgO es

$$J = -D \frac{\Delta c}{\Delta x} = -(9 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}) \left(-1.715 \times 10^{24} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}} \right)$$

$$J = 1.543 \times 10^{13} \frac{\text{átomos de Ni}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

El número total de átomos de níquel que atraviesan la interfaz de $2 \times 2 \text{ cm}$ por segundo es

$$\begin{aligned} \text{Total de átomos de Ni por segundo} &= (J)(\text{Área}) = (1.543 \times 10^{13} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}})(2 \text{ cm})(2 \text{ cm}) \\ &= 6.17 \times 10^{13} \text{ átomos de Ni/s} \end{aligned}$$

Aunque ésta parece ser muy rápida, en un segundo, el volumen de los átomos de níquel eliminados de la interfaz de Ni/MgO es

$$\frac{6.17 \times 10^{13} \frac{\text{átomos de Ni}}{\text{s}}}{8.573 \times 10^{22} \frac{\text{átomos de Ni}}{\text{cm}^3}} = 0.72 \times 10^{-9} \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$

El grosor en que se reduce la capa de níquel cada segundo es

$$\frac{0.72 \times 10^{-9} \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}}{4 \text{ cm}^2} = 1.8 \times 10^{-10} \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Para un micrómetro (10^{-4} cm) del níquel a eliminarse, el tratamiento requiere

$$\frac{10^{-4} \text{ cm}}{1.8 \times 10^{-10} \frac{\text{cm}}{\text{s}}} = 556\,000 \text{ s} = 154 \text{ h}$$

5-6

Factores que afectan la difusión

Temperatura y el coeficiente de difusión La cinética de la difusión depende en gran medida de la temperatura. El coeficiente de difusión D se relaciona con la temperatura por medio de una ecuación de tipo Arrhenius,

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (5-4)$$

donde Q es la energía de activación (en unidades de cal/mol) para la difusión de la especie bajo consideración (por ejemplo, Al en Si), R es la constante de los gases ($1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$) y T es la temperatura absoluta (K). D_0 es el término preexponencial, similar a c_0 en la ecuación 5-1.

D_0 es una constante para un sistema de difusión dado y es igual al valor del coeficiente de difusión a $1/T = 0$ o $T = \infty$. En la tabla 5-1 se dan los valores comunes de D_0 , mientras que en la figura 5-12 se muestra la dependencia de D en la temperatura para algunos metales y cerámicas. Los materiales enlazados de manera covalente, como el carbono y el

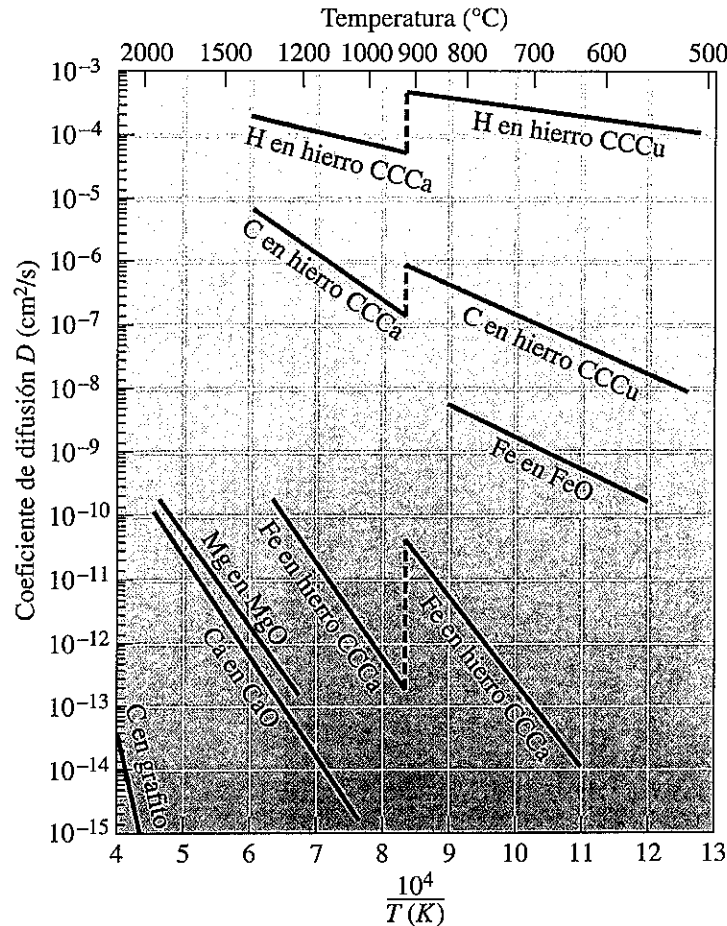


Figura 5-12 Coeficiente de difusión D como una función del recíproco de la temperatura para algunos metales y cerámicas. En esta gráfica de Arrhenius, D representa la velocidad del proceso de difusión. Una pendiente pronunciada indica una energía de activación alta.

silicio (tabla 5-1), tienen energías de activación inusualmente altas, consistentes con la gran fuerza de sus enlaces atómicos. La figura 5-13 muestra los coeficientes de difusión para distintos dopantes en el silicio.

En los materiales iónicos, como algunas de las cerámicas de óxido, un ion que se está difundiendo sólo entra en un sitio que tiene la misma carga. Para alcanzar ese sitio, el ion debe forzarse de manera física a través de los iones adyacentes, pasar por una región de carga opuesta y moverse una distancia relativamente larga (figura 5-14). En consecuencia, las energías de activación son altas y las velocidades de difusión son menores para los materiales iónicos que para los metales (figura 5-15 en la página 171). Se aprovecha esto en muchas situaciones. Por ejemplo, en el procesamiento del silicio (Si), se crea una capa delgada de sílice (SiO_2) en la parte superior de una oblea de silicio (capítulo 19). Después se crea una ventana para eliminar parte de la capa de sílice. La ventana permite la difusión selectiva de átomos dopantes como el fósforo (P) y el boro (B), debido a que la capa de sílice es esencialmente impermeable a los átomos dopantes. La difusión más lenta en la mayoría de los óxidos y otras cerámicas también es una ventaja en aplicaciones en las que se requiere que los componentes soporten temperaturas altas.

Cuando la temperatura de un material aumenta, el coeficiente de difusión D se incrementa (de acuerdo con la ecuación 5-4) y, por tanto, también aumenta el flujo de átomos.

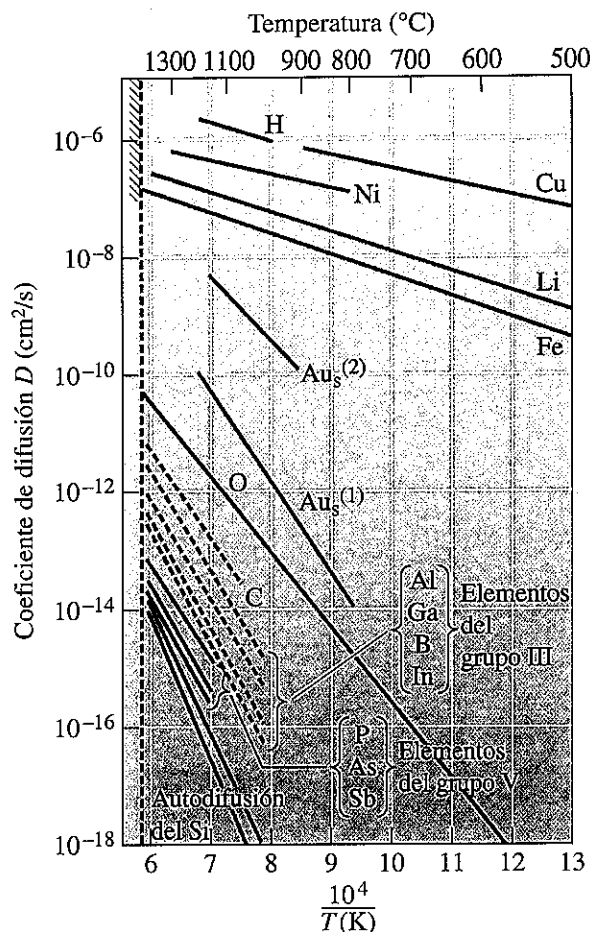


Figura 5-13

Coeficientes de difusión para distintos dopantes en el silicio. (De "Diffusion and Diffusion Induced Defects in Silicon" por U. Gösele. En R. Bloor, M. Flemings y S. Mahajan (Eds.), Encyclopedia of Advanced Materials, Vol. 1, 1994, p. 631, Fig. 2. Derechos reservados © 1994 Pergamon Press. Reimpreso con permiso del editor.)

A temperaturas más altas, la energía térmica suministrada a los átomos que se están difundiendo permite que los átomos superen la barrera de la energía de activación y se muevan con mayor facilidad a nuevos sitios. A temperaturas bajas, con frecuencia debajo de casi 0.4 veces la temperatura de fusión absoluta del material, la difusión es muy lenta y puede no ser significativa. Por esta razón, el tratamiento térmico de los metales y el procesamiento de las cerámicas se realizan a altas temperaturas, donde los átomos se mueven de manera rápida para completar las reacciones o para alcanzar las condiciones de equilibrio. Debido a que se requiere menos energía térmica para superar la barrera de la energía de activación menor, una pequeña energía de activación Q aumenta el coeficiente de difusión y el flujo. El siguiente ejemplo ilustra cómo la primera ley de Fick y los conceptos relacionados con la dependencia de la temperatura de D pueden aplicarse al diseño de una membrana de hierro.

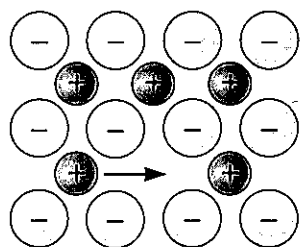


Figura 5-14

Difusión en compuestos iónicos. Los aniones sólo pueden entrar en otros sitios de aniones. Los cationes más pequeños tienden a difundirse más rápido.

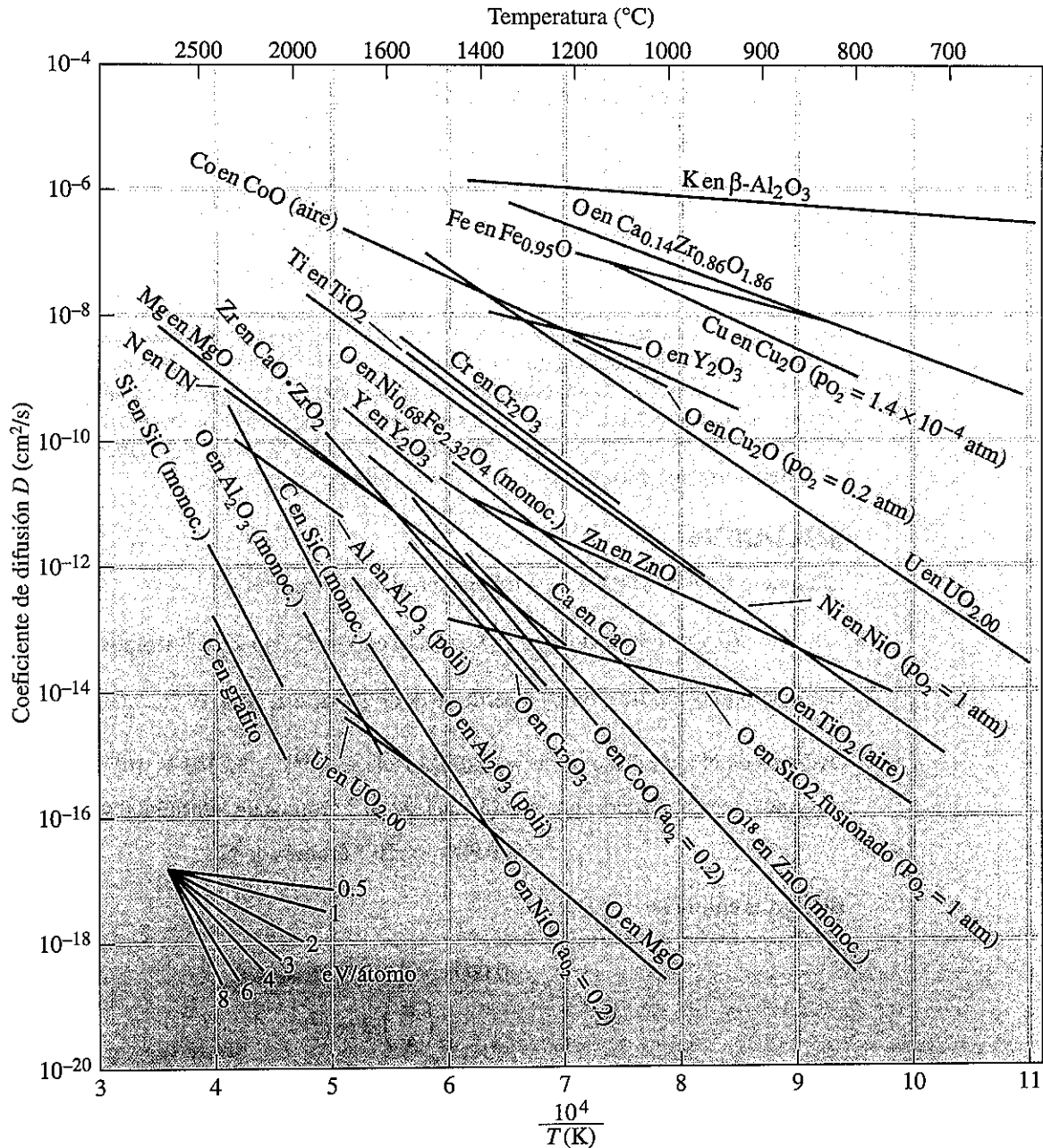


Figura 5-15 Coeficientes de difusión de iones en distintos óxidos. (Adaptado a partir de Physical Ceramics: Principles for Ceramic Science and Engineering, por Y. M. Chiang, D. Birnie y W. D. Kingery, Fig. 3-1. Derechos reservados © 1997 John Wiley & Sons. Este material se utiliza con permiso de John Wiley & Sons, Inc.)

Ejemplo 5-5

Problema de concentración de hidrógeno

Un cilindro impermeable de 3 cm de diámetro y 10 cm de largo contiene un gas que incluye 0.5×10^{20} átomos de N por cm^3 y 0.5×10^{20} átomos de H por cm^3 en un lado de una membrana de hierro (figura 5-16). Se introduce gas de manera continua al tubo

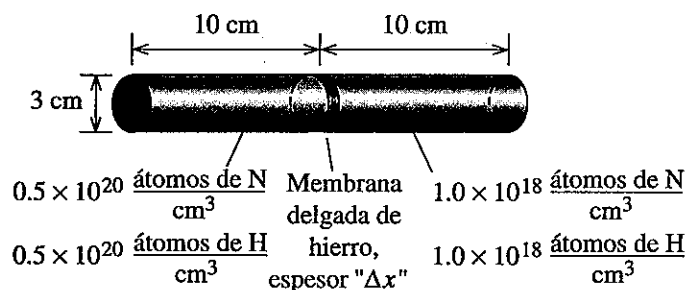


Figura 5-16
Diseño de una membrana de hierro (para el ejemplo 5-5).

para asegurar una concentración constante de nitrógeno e hidrógeno. El gas en el otro lado de la membrana incluye una constante de 1×10^{18} átomos de N por cm^3 y 1×10^{18} átomos de H por cm^3 . El sistema entero opera a 700°C , temperatura a la que el hierro tiene la estructura CCCu. Diseñe una membrana de hierro que no permita que se pierda más de 1% de nitrógeno a través de la membrana cada hora, pero que permita que 90% del hidrógeno pase a través de la membrana por hora.

SOLUCIÓN

El número total de átomos de nitrógeno en el contenedor es

$$(0.5 \times 10^{20} \text{ N/cm}^3)(\pi/4)(3 \text{ cm})^2(10 \text{ cm}) = 35.343 \times 10^{20} \text{ átomos de N}$$

El número máximo de átomos a perderse es de 1% de este total o

$$\text{Átomos de N a perderse por h} = (0.01)(35.34 \times 10^{20}) = 35.343 \times 10^{18} \text{ átomos de N/h}$$

$$\begin{aligned} \text{Átomos de N a perderse por s} &= (35.343 \times 10^{18} \text{ átomos de N/h})/(3600 \text{ s/h}) \\ &= 0.0098 \times 10^{18} \text{ átomos de N/s} \end{aligned}$$

El flujo es entonces

$$\begin{aligned} J &= \frac{0.0098 \times 10^{18} (\text{N átomos/s})}{\left(\frac{\pi}{4}\right)(3 \text{ cm})^2} \\ &= 0.00139 \times 10^{18} \text{ N} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \end{aligned}$$

Utilizando la ecuación 5-4 y los valores de la tabla 5-1, el coeficiente de difusión del nitrógeno en el hierro CCCu a $700^\circ\text{C} = 973 \text{ K}$ es

$$\begin{aligned} D &= D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \\ D_{\text{N}} &= 0.0047 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \exp\left[\frac{-18300 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}}{1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}} (973 \text{ K})}\right] \\ &= (0.0047)(7.748 \times 10^{-5}) = 3.64 \times 10^{-7} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \end{aligned}$$

A partir de la ecuación 5-3:

$$J = -D \left(\frac{\Delta c}{\Delta x} \right) = 0.00139 \times 10^{18} \frac{\text{átomos de N}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

$$\Delta x = -D \Delta c / J = \frac{\left[(-3.64 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}) (1 \times 10^{18} - 50 \times 10^{18} \frac{\text{átomos de N}}{\text{cm}^3}) \right]}{0.00139 \times 10^{18} \frac{\text{átomos de N}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}}$$

$$\Delta x = 0.013 \text{ cm} = \text{grosor mínimo de la membrana}$$

De manera similar, el grosor máximo de la membrana que permitirá que pase 90% del hidrógeno puede calcularse como

$$\text{Átomos de H a perderse por } h = (0.90)(35.343 \times 10^{20}) = 31.80 \times 10^{20}$$

$$\text{Átomos de H a perderse por } s = 0.0088 \times 10^{20}$$

$$J = 0.125 \times 10^{18} \frac{\text{átomos de H}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

A partir de la ecuación 5-4 y la tabla 5-1,

$$D_H = 0.0012 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \exp \left[\frac{-3600 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}}{1.987 \frac{\text{cal}}{\text{K} \cdot \text{mol}} (973 \text{ K})} \right] = 1.86 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$$

Dado que

$$\Delta x = -D \Delta c / J$$

$$\Delta x = \frac{\left(-1.86 \times 10^{-4} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \right) \left(-49 \times 10^{18} \frac{\text{átomos de H}}{\text{cm}^3} \right)}{0.125 \times 10^{18} \frac{\text{átomos de H}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}}$$

$$= 0.073 \text{ cm} = \text{grosor máximo}$$

Una membrana de hierro con un grosor entre 0.013 y 0.073 cm será satisfactoria.

Tipos de difusión En la difusión por volumen, los átomos se mueven a través del cristal de un sitio regular o intersticial a otro. Debido a los átomos circundantes, la energía de activación es grande y la velocidad de la difusión es relativamente lenta.

Los átomos también pueden difundirse a lo largo de los límites, interfaces y superficies en el material. Los átomos se difunden con facilidad por **difusión por límite de grano** debido a que el empaquetamiento atómico es desordenado y menos denso en los límites de grano. Debido a que los átomos pueden forzarse más fácilmente a través del límite de grano, la energía de activación es baja (tabla 5-2). La **difusión por superficie** es aún más fácil debido a que hay aun menos restricción en los átomos que se difunden en la superficie.

Tiempo La difusión requiere de tiempo. Las unidades para el flujo son $\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$. Si debe difundirse un gran número de átomos para producir una estructura uniforme, se requieren tiempos largos, aun a altas temperaturas. Los tiempos para los tratamientos térmicos pueden reducirse utilizando temperaturas mayores o haciendo las **distancias para la difusión** (relacionadas con Δx) lo más pequeñas posibles.

Se encuentra que se obtienen algunas estructuras y propiedades bastante notables si se previene la difusión. Los aceros se templean rápidamente a partir de altas temperaturas para

TABLA 5-2 ■ Efecto del tipo de difusión para el torio en tungsteno y para la autodifusión en la plata

Tipo de difusión	Coeficiente de difusión (D)			
	Torio en tungsteno		Plata en plata	
	D_0 (cm ² /s)	Q (cal/mol)	D_0 (cm ² /s)	Q (cal/mol)
Por superficie	0.47	66 400	0.068	8 900
Por límite de grano	0.74	90 000	0.24	22 750
Por volumen	1.00	120 000	0.99	45 700

* Datos por los parámetros para la ecuación 5-4.

prevenir la difusión forme estructuras sin equilibrio y proveer la base para tratamientos térmicos sofisticados. De manera similar, en la formación de vidrios metálicos, se tienen que templar los metales líquidos a una velocidad de enfriamiento muy alta. Esto es para evitar la difusión de átomos disminuyendo su energía térmica y fomentándolos a ensamblarse en arreglos amorfs sin equilibrio. Por otro lado, las fusiones de vidrios de silicato son viscosas y la difusión de los iones a través de ellos es lenta. Como resultado, no se tienen que enfriar estas fusiones de manera muy rápida para lograr una estructura amorfa. Existe el mito de que muchos edificios antiguos contienen cristales de ventanas que son más gruesos en la parte inferior que en la parte superior debido a que el vidrio ha fluido hacia abajo a través de los años. Con base en la cinética de la difusión, puede mostrarse que incluso varios cientos o miles de años no serán suficientes para ocasionar tal flujo de los vidrios a temperatura casi ambiente. En ciertos procesos de deposición de películas delgadas como la pulverización, en ocasiones se obtienen películas delgadas amorfas si los átomos o iones se templean rápidamente después de que se depositan en el sustrato. Si estas películas se calientan de manera subsecuente (después de la deposición) a temperaturas lo suficientemente altas, la difusión ocurrirá y las películas delgadas amorfas se cristalizarán con el tiempo. En el siguiente ejemplo, se examinan los diferentes mecanismos para la difusión.

Ejemplo 5-6

Considere un par de difusión colocado entre tungsteno puro y una aleación de tungsteno que contiene 1% de átomos de torio. Después de varios minutos de exposición a 2000 °C, se establece una zona de transición de 0.01 cm de grosor. ¿Cuál es el flujo de los átomos de torio en ese tiempo si la difusión se debe a a) difusión por volumen, b) difusión por límite de grano y c) difusión por superficie? (Véase la tabla 5-2.)

SOLUCIÓN

El parámetro de red del tungsteno CCCu es de 3.165 Å. Por tanto, el número de átomos/cm³ de tungsteno es

$$\frac{\text{átomos de W}}{\text{cm}^3} = \frac{2 \text{ átomos/celda}}{(3.165 \times 10^{-8})^3 \text{ cm}^3/\text{celda}} = 6.3 \times 10^{22}$$

En la aleación de tungsteno con 1% de átomos de torio, el número de átomos de torio es

$$c_{\text{Th}} = (0.01)(6.3 \times 10^{22}) = 6.3 \times 10^{20} \text{ Th } \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3}$$

En el tungsteno puro, el número de átomos de torio es cero. Por tanto, el gradiente de concentración es:

$$\frac{\Delta c}{\Delta x} = \frac{0 - 6.3 \times 10^{20} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3}}{0.01 \text{ cm}} = -6.3 \times 10^{22} \text{ Th } \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}}$$

a. Difusión por volumen

$$D = 1.0 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \exp \left(\frac{-120\,000 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}}{\left(1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right)(2273 \text{ K})} \right) = 2.89 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$J = -D \frac{\Delta c}{\Delta x} = -\left(2.89 \times 10^{-12} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}\right) \left(-6.3 \times 10^{22} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}}\right) \\ = 18.2 \times 10^{10} \frac{\text{átomos de Th}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

b. Difusión por límite de grano

$$D = 0.74 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \exp \left(\frac{-90\,000 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}}{\left(1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right)(2273 \text{ K})} \right) = 1.64 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$J = -\left(1.64 \times 10^{-9} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}\right) \left(-6.3 \times 10^{22} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}}\right) = 10.3 \times 10^{13} \frac{\text{átomos de Th}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

c. Difusión por superficie

$$D = 0.47 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \exp \left(\frac{-66\,400 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}}{\left(1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right)(2273 \text{ K})} \right) = 1.94 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$J = -\left(1.94 \times 10^{-7} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}\right) \left(-6.3 \times 10^{22} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}}\right) = 12.2 \times 10^{15} \frac{\text{átomos de Th}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

Dependencia en el enlace y la estructura cristalina Varios factores influyen en la energía de activación para la difusión y, por tanto, en la velocidad de la difusión. La difusión intersticial, con una energía de activación baja, por lo regular se lleva a cabo mucho más rápido que la de por vacancia, o difusión sustitucional. Las energías de activación por lo general son menores para los átomos que se difunden a través de estructuras cristalinas abiertas que las de a través de estructuras cristalinas compactas. Debido a que la energía de activación depende de la fuerza del enlace atómico, es mayor para la difusión de átomos en materiales con una temperatura de fusión alta (figura 5-17).

También se encuentra que, debido a su menor tamaño, los cationes (con una carga positiva) con frecuencia tienen coeficientes de difusión mayores que los de los aniones (con una carga negativa). Por ejemplo, en el cloruro de sodio la energía de activación para la difusión de los iones cloruro (Cl^-) es casi del doble que para la difusión de los iones sodio (Na^+).

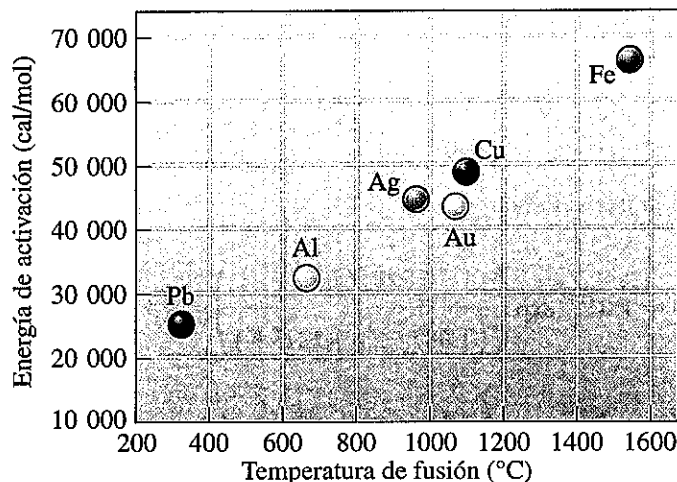


Figura 5-17

La energía de activación para la autodifusión aumenta a medida que se incrementa el punto de fusión del metal.

La difusión de los iones también provee una transferencia de carga eléctrica; de hecho, la conductividad eléctrica de los materiales cerámicos enlazados de manera iónica se relaciona con la temperatura por medio de una ecuación de Arrhenius. A medida que la temperatura aumenta, los iones se difunden con mayor rapidez, la carga eléctrica se transfiere más rápido y se incrementa la conductividad eléctrica. Como se mencionó anteriormente, algunos materiales cerámicos son buenos conductores de electricidad.

Dependencia de la concentración de las especies que se están difundiendo y de la composición de la matriz

El coeficiente de difusión (D) no sólo depende de la temperatura, como lo da la ecuación 5-4, sino también de la concentración de las especies que se están difundiendo y de la composición de la matriz. Usted debe consultar textos de nivel más alto para más información.

5-7

Permeabilidad de los polímeros

En los polímeros se trata principalmente con la difusión de átomos o moléculas pequeñas entre las cadenas de polímero largas. Como ingenieros, con frecuencia se cita la permeabilidad de los polímeros y otros materiales, en lugar de los coeficientes de difusión. La **permeabilidad** se expresa en términos del volumen del gas o vapor que puede permearse por unidad de área, por unidad de tiempo o por unidad de grosor a una temperatura y humedad relativa específicas. Los polímeros que contienen un grupo polar (por ejemplo, el alcohol etileno vinílico) tienen una permeabilidad mayor para el vapor de agua que para el gas oxígeno. Por otro lado, el polietileno tiene una permeabilidad mucho mayor para el oxígeno que para el vapor de agua. En general, mientras más compacta sea la estructura de los polímeros, menor será la permeabilidad. Por ejemplo, el polietileno de baja densidad tiene una permeabilidad mayor que el polietileno de alta densidad. Los polímeros empleados para alimentos y otras aplicaciones necesitan tener las propiedades de barrera apropiadas. Por ejemplo, por lo regular se utilizan películas de polímero envolver alimentos para su almacenamiento. Si el aire se difunde a través de la película, el alimento puede echarse a perder. De manera similar, debe tenerse cuidado en el almacenamiento de polvos cerámicos o metálicos que sean sensibles al vapor de agua atmosférico, al nitrógeno, al oxígeno o al dióxido de carbono. Por ejemplo, los polvos de óxido de zinc utilizados en hules, pinturas y cerámicas deben almacenarse en bolsas de polietileno para evitar reacciones con el vapor de agua atmosférico.

La difusión de algunas moléculas en un polímero puede ocasionar problemas de hinchamiento. Por ejemplo, en las aplicaciones automotrices, se utilizan polímeros para fabricar anillos herméticos que puedan absorber cantidades considerables de aceite, lo que ocasiona que se hinchen. Por otro lado, se requiere la difusión para permitir que los tintes entren de manera uniforme en muchos de los tejidos poliméricos sintéticos. La difusión selectiva a través de membranas poliméricas se utiliza para la desalinización del agua. Las moléculas de agua pasan a través de la membrana polimérica y se atrapan los iones de la sal.

En cada uno de estos ejemplos, los átomos, iones o moléculas que se están difundiendo penetran entre las cadenas de polímero en vez de moverse de una localización a otra dentro de la estructura de la cadena. La difusión será más rápida a través de esta estructura cuando la especie que se está difundiendo sea más pequeña o cuando se presenten vacíos mayores entre las cadenas. Por ejemplo, la difusión a través de polímeros cristalinos es más lenta que a través de polímeros amorfos, los cuales no tienen orden de largo alcance y, en consecuencia, tienen una densidad menor.

5-8 Perfil de composición [segunda ley de Fick]

La **segunda ley de Fick**, la cual describe la difusión dinámica, o de estado no estacionario, de átomos es la ecuación diferencial

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (5-5)$$

Si se supone que el coeficiente de difusión D no es una función de la localización x ni de la concentración (c) de la especie que se está difundiendo, se puede escribir una versión simplificada de la segunda ley de Fick como

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right) \quad (5-6)$$

La solución para esta ecuación depende de las condiciones limitantes para una situación en particular. Una solución es

$$\frac{c_s - c_x}{c_s - c_0} = \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (5-7)$$

donde c_s es una concentración constante de los átomos que se están difundiendo en la superficie del material, c_0 es la concentración uniforme inicial de los átomos que se están difundiendo en el material y c_x es la concentración del átomo que se está difundiendo en la localización x debajo de la superficie después de un tiempo t . En la figura 5-18 se ilustran estas concentraciones. En estas ecuaciones se ha supuesto básicamente un modelo unidimensional (es decir, se supone que los átomos u otras especies que se están difundiendo sólo se están moviendo en la dirección x). La función "erf" es la función de error y puede evaluarse a partir

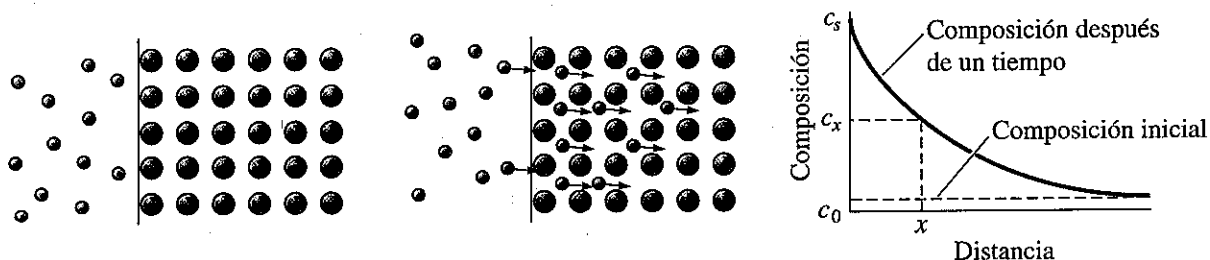


Figura 5-18 Difusión de átomos en la superficie de un material que ilustra el uso de la segunda ley de Fick.

TABLA 5-3 ■ Valores de la función de error para la segunda ley de Fick

Argumento de la función de error $\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$	Valor de la función de error $\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$
0	0
0.10	0.1125
0.20	0.2227
0.30	0.3286
0.40	0.4284
0.50	0.5205
0.60	0.6039
0.70	0.6778
0.80	0.7421
0.90	0.7969
1.00	0.8427
1.50	0.9661
2.00	0.9953

Observe que los valores de la función de error están disponibles en muchos paquetes de software disponibles en computadoras personales.

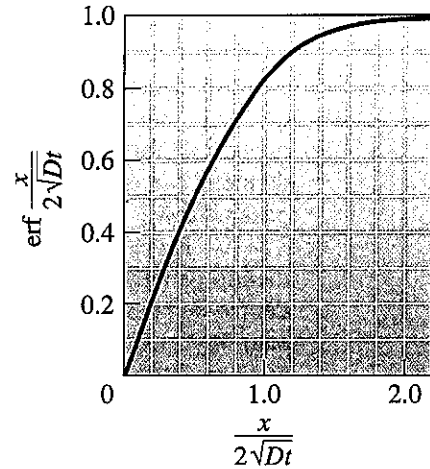


Figura 5-19 Gráfica que muestra el argumento y el valor de la función de error encontrados en la segunda ley de Fick.

de la tabla 5-3 o de la figura 5-19. Observe que la mayoría de los programas de cálculo y otros disponibles en una computadora personal (por ejemplo, Excel™) también proveen valores para la función de error.

La definición matemática de la función de error es la que sigue:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-y^2) dy \quad (5-8)$$

En la ecuación 5-8, se conoce a y como el argumento de la función de error. También se define una función de error complementaria como

$$\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x) \quad (5-9)$$

Esta función se utiliza en ciertas formas de solución de la segunda ley de Fick.

Como se mencionó anteriormente, dependiendo de las condiciones limitantes, distintas soluciones (es decir, diferentes ecuaciones) describen las soluciones para la segunda ley de Fick. Estas soluciones para la segunda ley de Fick permiten calcular la concentración de una especie que se está difundiendo como una función del tiempo (t) y de la localización (x). La ecuación 5-7 es una solución posible para la segunda ley de Fick que describe la variación en la concentración de distintas especies cerca de la superficie del material como una función del tiempo y la distancia, siempre que el coeficiente de difusión D permanezca constante y que las concentraciones de los átomos que se están difundiendo en la superficie (c_s) y a una distancia grande (x) dentro del material (c_0) permanezcan invariantes. La segunda ley de Fick también puede asistir en el diseño de una variedad de técnicas de procesamiento de materiales, incluyendo la **carbura**ción y la difusión de dopantes en semiconductores como se describe en los siguientes ejemplos.

Ejemplo 5-7

La superficie de un engrane de acero con 0.1% C se tiene que endurecer por carburaación. En la carburaación gaseosa, los engranes de acero se colocan en una atmósfera que provee 1.2% C en la superficie del acero a una temperatura alta (figura 5-1). El carbono se difunde de la superficie hacia el acero. Para las propiedades óptimas, el acero debe

contener 0.45% C a una profundidad de 0.2 cm debajo de la superficie. Diseñe un tratamiento térmico de carburación que produzca estas propiedades óptimas. Suponga que la temperatura es lo suficientemente alta (al menos de 900 °C) de tal manera que el hierro tiene la estructura CCCa.

SOLUCIÓN

Dado que las condiciones limitantes para las cuales se dedujo la ecuación 5-7 se suponen válidas, se puede utilizar esta ecuación:

$$\frac{c_s - c_x}{c_s - c_0} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

Se sabe que $c_s = 1.2\% \text{ C}$, $c_0 = 0.1\% \text{ C}$, $c_x = 0.45\% \text{ C}$ y $x = 0.2 \text{ cm}$. A partir de la segunda ley de Fick:

$$\frac{c_s - c_x}{c_s - c_0} = \frac{1.2\% \text{ C} - 0.45\% \text{ C}}{1.2\% \text{ C} - 0.1\% \text{ C}} = 0.68 = \operatorname{erf}\left(\frac{0.2 \text{ cm}}{2\sqrt{Dt}}\right) = \operatorname{erf}\left(\frac{0.1 \text{ cm}}{\sqrt{Dt}}\right)$$

A partir de la tabla 5-3, se encuentra que:

$$\frac{0.1 \text{ cm}}{\sqrt{Dt}} = 0.71 \text{ o } Dt = \left(\frac{0.1}{0.71}\right)^2 = 0.0198 \text{ cm}^2$$

Cualquier combinación de D y t con un producto de 0.0198 cm² funcionará. Para la difusión de carbono en hierro CCCa, el coeficiente de difusión se relaciona con la temperatura por medio de la ecuación 5-4:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$$

A partir de la tabla 5-1:

$$D = 0.23 \exp\left(\frac{-32\,900 \text{ cal/mol}}{1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}} T (\text{K})}\right) = 0.23 \exp\left(\frac{-16\,558}{T}\right)$$

Por tanto, la temperatura y el tiempo del tratamiento térmico se relacionan por medio de

$$t = \frac{0.0198 \text{ cm}^2}{D \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}} = \frac{0.0198 \text{ cm}^2}{0.23 \exp(-16\,558/T) \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}} = \frac{0.0861}{\exp(-16\,558/T)}$$

Algunas combinaciones típicas de temperaturas y tiempos son:

Si $T = 900^\circ \text{C} = 1173 \text{ K}$, entonces $t = 116\,273 \text{ s} = 32.3 \text{ h}$

Si $T = 1000^\circ \text{C} = 1273 \text{ K}$, entonces $t = 38\,362 \text{ s} = 10.7 \text{ h}$

Si $T = 1100^\circ \text{C} = 1373 \text{ K}$, entonces $t = 14\,876 \text{ s} = 4.13 \text{ h}$

Si $T = 1200^\circ \text{C} = 1473 \text{ K}$, entonces $t = 6\,560 \text{ s} = 1.82 \text{ h}$

La combinación exacta de temperatura y tiempo dependerá de la temperatura máxima que pueda alcanzar el horno para el tratamiento térmico, de la velocidad a la que deben producirse las partes y de la economía de los balances entre las altas temperaturas contra tiempos mayores. Otro factor a considerar son los cambios en la microestructura que ocurren en el resto del material. Por ejemplo, mientras el carbono se difunde en la superficie, el resto de la microestructura puede comenzar a experimentar un crecimiento del grano u otros cambios.

El ejemplo 5-8 muestra que una de las consecuencias de la segunda ley de Fick es que puede obtenerse el mismo perfil de concentración para distintas condiciones de procesamiento, siempre y cuando el término Dt sea constante. Esto permite determinar el efecto de la temperatura en el tiempo requerido para que se complete un tratamiento térmico en particular.

Ejemplo 5-8

Se requieren 10 h para carburar de manera exitosa un lote de 500 engranajes de acero a 900 °C, donde el hierro tiene la estructura CCCa. Se encuentra que cuesta \$1 000 (dólares) por hora operar el horno para la carburación a 900 °C y \$1 500 por hora para operar el horno a 1 000 °C. ¿Es económico incrementar la temperatura de la carburación a 1 000 °C? ¿Qué otros factores deben considerarse?

SOLUCIÓN

De nuevo, se supone que se puede utilizar la solución de la segunda ley de Fick dada por medio de la ecuación 5-7:

$$\frac{c_s - c_x}{c_s - c_0} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

Observe que, dado que sólo se trata con cambios en el tiempo y la temperatura del tratamiento térmico, el término Dt debe ser constante.

Las temperaturas de interés son 900 °C = 1 173 K y 1000 °C = 1 273 K. Para lograr el mismo tratamiento de carburación a 1 000 °C que a 900 °C:

$$D_{1273}t_{1273} = D_{1173}t_{1173}$$

Para que el carbono se difunda en el hierro CCCa, la energía de activación es de 32 900 cal/mol. Dado que se está tratando con razones de tiempos, no importa si se sustituye el tiempo en horas o segundos. Sin embargo, siempre es una buena idea utilizar unidades que se cancelen. Por tanto, el tiempo se mostrará en segundos. Observe que la temperatura debe convertirse a Kelvin.

$$D_{1273}t_{1273} = D_{1173}t_{1173}$$

$$D = D_0 \exp(-Q/RT)$$

$$t_{1273} = \frac{D_{1173}t_{1173}}{D_{1273}}$$

$$= \frac{D_0 \exp\left(-\frac{32\,900 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}}{1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}} 1173 \text{ K}}\right) (10 \text{ horas})(3\,600 \text{ s/hora})}{D_0 \exp\left(-\frac{32\,900 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}}{1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}} 1273 \text{ K}}\right)}$$

$$\begin{aligned}
 t_{1273} &= \frac{\exp(-14.1156)(10)(3600)}{\exp(-13.0068)} \\
 &= (10)(0.3299)(3600) \text{ s} \\
 t_{1273} &= 3.299 \text{ h} = 3 \text{ h y } 18 \text{ min}
 \end{aligned}$$

Observe que no se necesitó el valor del término preexponencial D_0 , dado que se canceló.

A 900 °C, el costo por parte es de $(\$1000/\text{h})(10 \text{ h})/500 \text{ partes} = \$20/\text{parte}$.
A 1000 °C, el costo por parte es de $(\$1500/\text{h})(3.299 \text{ h})/500 \text{ partes} = \$9.90/\text{parte}$.

Únicamente considerando el costo de operación del horno, el incremento de la temperatura reduce el costo del tratamiento térmico de los engranajes e incrementa la velocidad de producción. Otro factor a considerar es si el tratamiento térmico a 1000 °C pudiera ocasionar algún cambio microestructural o de otro tipo. Por ejemplo, ¿el incremento de temperatura ocasionaría que los granos crecieran de manera significativa? Si éste es el caso, se debilitará todo el material. ¿Cómo afecta el incremento en temperatura la vida de otro equipo como el mismo horno y cualquier accesorio? ¿Cuánto tiempo tomaría el enfriamiento? ¿El enfriamiento a partir de una temperatura mayor ocasionaría esfuerzos residuales? ¿El producto seguirá satisfaciendo las demás especificaciones? Deben considerarse estas y otras preguntas. El punto es que, como ingenieros, se necesita asegurar que la solución propuesta no es sólo técnicamente buena y económicamente razonable, debe reconocerse y tener sentido para el sistema como un todo. Una buena solución con frecuencia es simple, resuelve problemas para el sistema y no crea nuevos problemas.

Ejemplo 5-9

Fabricación de un dispositivo de silicio

Los dispositivos como los transistores se fabrican dopando semiconductores. El coeficiente de difusión del fósforo (P) en Si es $D = 6.5 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s}$ a una temperatura de 1100 °C. Suponga que la fuente provee una concentración superficial de $10^{20} \text{ átomos}/\text{cm}^3$ y que el tiempo de difusión es de una hora. Suponga que la oblea de silicio inicialmente no contiene P.

Calcule la profundidad a la que la concentración del P será de $10^{18} \text{ átomos}/\text{cm}^3$. Enuncie cualquier suposición que haya realizado al resolver este problema.

SOLUCIÓN

Se supone que se puede utilizar una de las soluciones para la segunda ley de Fick (es decir, la ecuación 5-7):

$$\frac{c_s - c_x}{c_s - c_0} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

Se utilizarán concentraciones en átomos/ cm^3 , tiempo en segundos y D en $\frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$. Observe que el lado izquierdo es adimensional. Por tanto, siempre que se utilicen concentraciones en las mismas unidades para c_s , c_x y c_0 , no importa qué unidades sean.

$$\frac{c_s - c_x}{c_s - c_0} = \frac{10^{20} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3} - 10^{18} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3}}{10^{20} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3} - 0 \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3}} = 0.99$$

$$= \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{(6.5 \times 10^{-13} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}})(3600 \text{ s})}} \right]$$

$$= \operatorname{erf} \left(\frac{x}{9.67 \times 10^{-5}} \right)$$

A partir de los valores de la función de error en la tabla 5-3 (o a partir de su calculadora/computadora),

Si $\operatorname{erf}(z) = 0.99$, $z = 1.82$, por tanto,

$$1.82 = \frac{x}{9.67 \times 10^{-5}}$$

o

$$x = 1.76 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

o

$$x = (1.76 \times 10^{-4} \text{ cm}) \left(\frac{10^4 \mu\text{m}}{\text{cm}} \right)$$

$$x = 1.76 \mu\text{m}$$

Observe que se ha expresado la respuesta final en micrómetros dado que ésta es la escala de longitud que es apropiada para esta aplicación. Las suposiciones principales que se realizaron son (1) el valor de D no cambia mientras se incorpora el fósforo (P) en la oblea de silicio y (2) la difusión de P sólo es una dimensión (es decir, se ignora cualquier difusión lateral).

Limitaciones para la aplicación de la solución de la función de error dada por la ecuación 5-7

Observe que en la ecuación que describe la segunda ley de Fick (ecuación 5-7):

- Se supone que D es independiente de la concentración de la especie que se está difundiendo;
- la concentración en la superficie de la especie que se está difundiendo (c_s) siempre es constante.

Existen situaciones en las que estas condiciones pueden no cumplirse y por tanto la evolución del perfil de concentración no se pronosticará por medio de la solución de la función de error mostrada en la ecuación 5-7. Si las condiciones limitantes son distintas de las supuestas, deben utilizarse soluciones diferentes para la segunda ley de Fick.

5-9

Difusión y procesamiento de materiales

En la sección 5-1 se explicaron de manera breve aplicaciones de la difusión en el procesamiento de materiales. Muchos ejemplos importantes relacionados con la solidificación, las transformaciones de fases, los tratamientos térmicos, etc., se explicarán en capítulos posteriores. En esta sección se provee más información para realzar la importancia de la difusión en el procesamiento de materiales de ingeniería. Los procesos de difusión se vuelven muy importantes cuando los materiales se utilizan o procesan a temperaturas elevadas.

Fusión y colado Uno de los métodos más ampliamente utilizados para el procesamiento de metales, aleaciones, muchos plásticos y vidrios involucra la fusión y el colado de materiales en una forma deseada. La difusión desempeña una función particularmente importante en la solidificación de metales y aleaciones. Por ejemplo, durante el crecimiento de monocristales de semiconductores, se debe asegurar que se tomen en cuenta las diferencias en la difusión de los dopantes en las formas fundida y sólida. Esto también se aplica para la difusión de elementos durante el colado de aleaciones. De manera similar, la difusión desempeña una función crítica en el procesamiento de vidrios. Por ejemplo, en los vidrios inorgánicos se cuenta con el hecho de que la difusión es lenta y que los vidrios inorgánicos no se cristalizan con facilidad. En el capítulo 9 se examinará este tema.

Sinterizado Aunque los métodos de colado y fundición son muy populares para muchos materiales manufacturados, los puntos de fusión de muchas cerámicas y algunos materiales metálicos son demasiado altos para el procesamiento por fusión y colado. Estos materiales relativamente refractarios se manufacturan en formas útiles por medio de un proceso que requiere la consolidación de partículas pequeñas de un polvo en una masa sólida (capítulo 15). El **sinterizado** es el tratamiento a alta temperatura que ocasiona que las partículas se unan, reduciendo de manera gradual el volumen del espacio poroso entre ellas. La sinterización es una etapa frecuente en la fabricación de componentes cerámicos (por ejemplo, la alúmina, el titanato de bario, etc.) al igual que en la producción de partes metálicas por medio de la **metalurgia de polvos**, una ruta de procesamiento por medio de la cual se prensan polvos metálicos y se sinterizan para formar componentes densos monolíticos. Una variedad de materiales compuestos como las herramientas de corte basadas en carburo de tungsteno-cobalto, superaleaciones, etc., se producen utilizando esta técnica. Con partículas más finas, hay muchos átomos o iones en la superficie para los que no se satisfacen los enlaces atómicos o iónicos. Como resultado, una colección de partículas finas de una cierta masa tiene una energía mayor que la de un material cohesivo sólido de la misma masa. Por tanto, la fuerza conductora para la sinterización de estado sólido de metales y cerámicas en polvo es la *reducción en el área superficial total* de las partículas de polvo. Cuando se compacta en una forma un material en polvo, las partículas de polvo están en contacto entre sí en numerosos sitios, con una cantidad significativa de espacio poroso entre ellas. Para reducir la energía total del material, los átomos se difunden a los puntos de contacto, enlazando las partículas entre sí y con el tiempo ocasionando que los poros se contraigan.

La difusión reticular del volumen de las partículas en la región estrecha ocasiona su densificación. La difusión en la superficie, la difusión en fase gaseosa o de vapor y la difusión reticular de las superficies curvadas en el área estrecha entre las partículas no conducen a la densificación (capítulo 15). Si la sinterización se lleva a cabo durante un periodo largo, los poros pueden eliminarse y el material se vuelve denso (figura 5-20). En la figura 5-21, se muestran

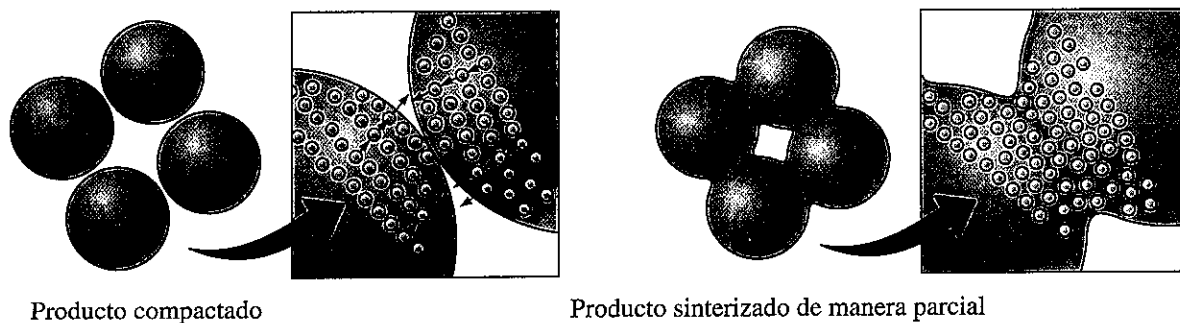


Figura 5-20 Proceso de difusión durante la sinterización y la metalurgia de polvos. Los átomos se difunden a los puntos de contacto, creando puentes y reduciendo el tamaño de los poros.

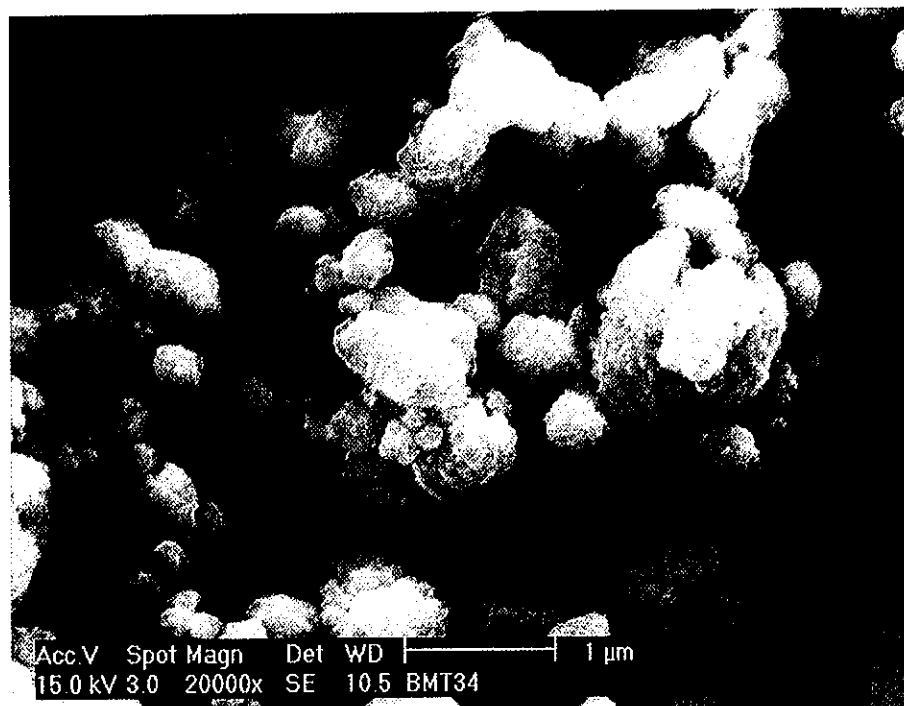


Figura 5-21 Se muestran las partículas del polvo de tantalato de magnesio y bario (BMT) ($\text{Ba}(\text{Mg}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3$). Este material cerámico es útil en la fabricación de componentes electrónicos conocidos como resonadores dieléctricos que se utilizan en las comunicaciones inalámbricas. (Cortesía de H. Shivey.)

las partículas de un polvo de un material cerámico conocido como tantalato de magnesio y bario ($\text{Ba}(\text{Mg}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3$ o BMT). Este material cerámico es útil en la fabricación de componentes electrónicos conocidos como *resonadores dieléctricos* utilizados en sistemas de comunicación inalámbrica. En la figura 5-22 se muestra la microestructura de las cerámicas BMT. Estas cerámicas se produjeron compactando los polvos en una prensa y sinterizando el compacto a una temperatura alta ($\sim 1500^\circ\text{C}$).

La extensión y la velocidad de la sinterización dependen de a) la densidad inicial de los compactos, b) de la temperatura, c) del tiempo, d) del mecanismo de sinterización, e) del tamaño promedio de la partícula y f) de la distribución del tamaño de las partículas de polvo. En algunas situaciones, se forma una fase líquida en regiones localizadas del material cuando la sinterización está en proceso. Dado que la difusión de las especies, como átomos o iones, es más rápida en líquidos que en el estado sólido, la presencia de una fase líquida puede proveer una manera conveniente para acelerar la sinterización de muchas formulaciones refractarias metálicas y cerámicas. Al proceso en el que se forma una cantidad pequeña de formas líquidas y asiste la densificación se le conoce como **sinterización en fase líquida**. Para que la fase líquida sea efectiva en la mejora de la sinterización, es importante tener un líquido que pueda “mojar” los granos, en forma similar a como el agua moja una superficie de vidrio. Si el líquido no moja, de manera similar a como el mercurio no moja el vidrio, entonces la fase líquida no ayudará a mejorar la sinterización. En algunos casos se adicionan compuestos a los materiales para ocasionar que se forme una fase líquida a las temperaturas de sinterización. En otras situaciones, las impurezas pueden reaccionar con el material y ocasionar la formación de una fase líquida. En la mayoría de las aplicaciones, es deseable si la fase líquida es transitoria o se convierte en un material cristalino durante el enfriamiento. De esta manera no permanece en los límites de grano una fase amorfa vidriosa y quebradiza.

Cuando se necesitan densidades excepcionalmente altas, se aplica una presión (uniaxial o isostática) mientras el material se está sinterizando. A estas técnicas se les conoce

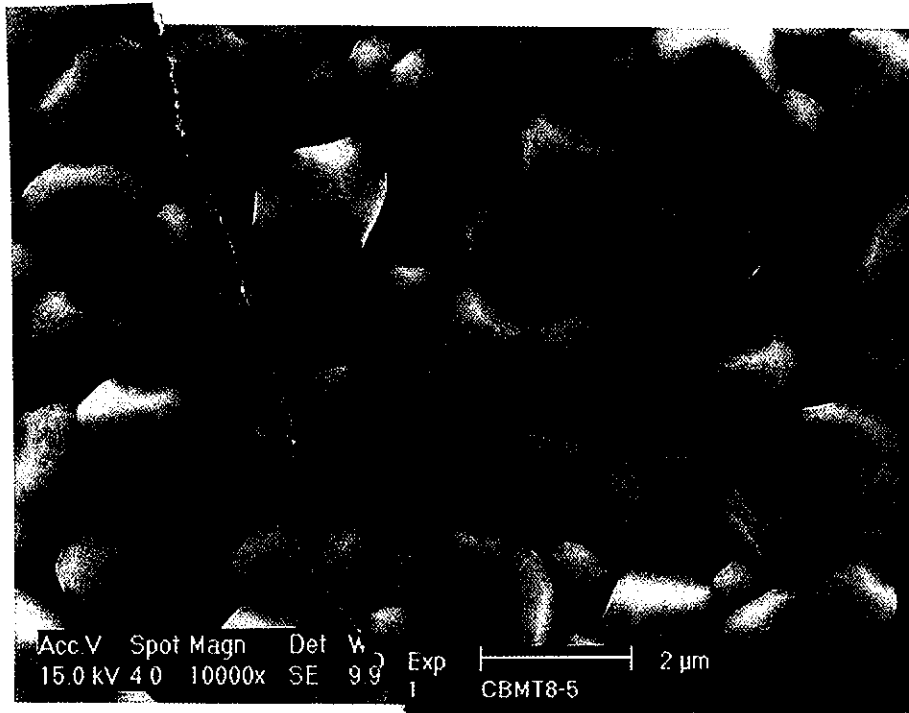


Figura 5-22 Microestructura de las cerámicas BMT obtenida por la compactación y sinterización de polvos de BMT. (Cortesía de H. Shivey.)

como **prensado en caliente**, cuando la presión es unidireccional o **prensado isostático en caliente** (PIC), cuando la presión es isostática (es decir, aplicada en todas las direcciones). Muchas superaleaciones y cerámicas como el titanato de plomo, lantano o zirconio (PLZT) se procesan utilizando estas técnicas. El prensado isostático en caliente conduce a materiales con una densidad alta con propiedades isotrópicas (capítulo 15).

Crecimiento de granos Un material policristalino contiene una gran cantidad de límites de granos, lo cual representa áreas de alta energía debido al empaquetamiento ineficiente de los átomos. Se obtiene una energía total menor en el material si la cantidad del área de los límites de granos es reducida por el crecimiento de granos. El **crecimiento de granos** involucra el movimiento de los límites de granos, lo que permite que los granos mayores crezcan a expensas de los granos pequeños (figura 5-23). Si ha visto la espuma, ¡probablemente ha observado el principio del crecimiento de los granos! El crecimiento de los granos es similar a la manera en que las burbujas más pequeñas en la espuma desaparecen a expensas de las burbujas más grandes. ¡Otra analogía es el pez grande que se vuelve más grande comiendo al pez pequeño! Para el crecimiento de los granos en los materiales, se requiere la difusión de los átomos a través del límite de los granos y, en consecuencia, el crecimiento de los granos está relacionado con la energía de activación necesaria para que un átomo salte a través del límite. El incremento en el tamaño de los granos puede observarse a partir de la secuencia de micrografías para las cerámicas de alúmina mostradas en la figura 5-23. Otro ejemplo para el que el crecimiento de los granos desempeña una función está en el filamento de tungsteno (W) en una bombilla eléctrica. A medida que se calienta el filamento de tungsteno, los granos crecen ocasionando que se debilite. El crecimiento de los granos, la vaporización del tungsteno y la oxidación por medio de la reacción con el oxígeno remanente contribuyen a la falla de los filamentos de tungsteno en una bombilla eléctrica.

La **fuerza impulsora** para el crecimiento de los granos es la reducción en el área de los límites de los granos. Los límites de los granos son defectos y su presencia ocasiona que aumente la energía libre del material. Por tanto, la tendencia termodinámica de los materiales policristalinos es transformarse en materiales que tengan un tamaño promedio de los granos

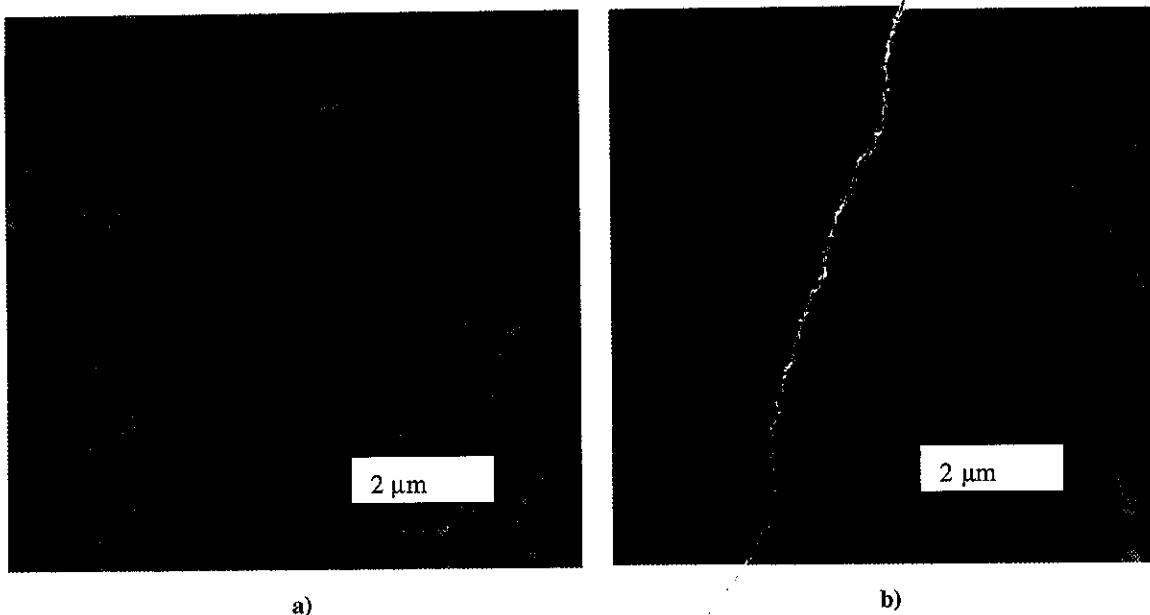


Figura 5-23 El crecimiento de los granos en las cerámicas de alúmina puede observarse a partir de las micrografías electrónicas de barrido de las cerámicas de alúmina. a) La micrografía izquierda muestra la microestructura de una cerámica de alúmina sinterizada a 1350 °C durante 15 horas; b) La micrografía derecha presenta una muestra sinterizada a 1350 °C durante 30 horas. (Cortesía de los doctores Ian Nettleship y Richard McAfee.)

más grandes. Las temperaturas altas o las energías de activación bajas incrementan el tamaño de los granos. Varios tratamientos térmicos de metales, incluyendo mantener el metal a temperaturas altas, deben controlarse con cuidado para *evitar* un crecimiento excesivo de los granos. Esto se debe a que, a medida que crece el tamaño promedio de los granos, el área de los límites de los granos disminuye y en consecuencia hay una menor resistencia al movimiento de las dislocaciones. Como resultado, la resistencia de un material metálico disminuirá con el incremento del tamaño de los granos. Se ha visto este concepto antes en la forma de la ecuación de Hall-Petch (capítulo 4). En el **crecimiento normal de granos** el tamaño promedio de los granos aumenta de manera estable y la amplitud de la distribución del tamaño de los granos no se afecta de manera severa. En el **crecimiento anormal de granos** la distribución del tamaño de los granos tiende a volverse bimodal (es decir, se obtienen unos cuantos granos que son muy grandes y entonces se tienen unos cuantos granos que siguen siendo relativamente pequeños). Ciertas propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas de los materiales también dependen del tamaño de los granos de los materiales. Como resultado, en el procesamiento de estos materiales, se tiene que poner atención a los factores que afectan las velocidades de difusión y al crecimiento de granos.

Enlazamiento por difusión Un método utilizado para unir materiales, llamado **enlazamiento por difusión**, se lleva a cabo en tres etapas (figura 5-24). La primera etapa une las dos superficies entre sí a una temperatura y presión altas, aplanando la superficie, fragmentando las impurezas y produciendo un área de alto contacto átomo-átomo. A medida que las superficies permanecen presionadas entre sí a altas temperaturas, los átomos se difunden a lo largo de los límites de los granos a los vacíos restantes; los átomos se condensan y reducen el tamaño de cualquier vacío en la interfaz. Debido a que la difusión por límite de los granos es rápida, esta segunda etapa puede llevarse a cabo de manera muy rápida. Sin embargo, con el tiempo el crecimiento de granos aísla los vacíos restantes de los límites de los granos. Para la tercera etapa, eliminación final de los vacíos, debe llevarse a cabo una difusión por volumen, la cual es comparativamente lenta. El proceso de enlazamiento por difusión se utiliza con frecuencia para unir metales reactivos tales como el titanio, para unir metales y materiales disímiles y para unir cerámicas.

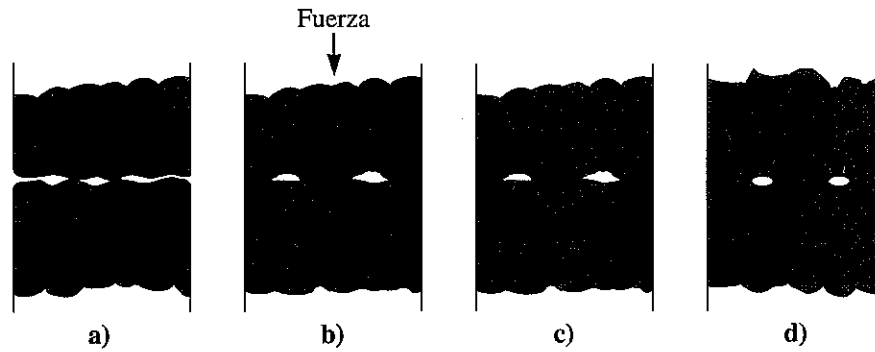


Figura 5-24 Etapas en el enlazamiento por difusión: a) inicialmente el área de contacto es pequeña; b) la aplicación de una presión deforma la superficie, incrementando el área de enlace; c) la difusión por límite de los granos permite que los vacíos se contraigan, y d) la eliminación final de los vacíos requiere difusión por volumen.

Resumen

- El flujo neto de átomos, iones, etc., que resulta de la difusión depende del gradiente de concentración inicial.
- La cinética de la difusión depende en gran medida de la temperatura. En general, la difusión es un proceso activado de manera térmica y la dependencia del coeficiente de difusión en la temperatura está dada por la ecuación de Arrhenius.
- La extensión de difusión depende de la temperatura, del tiempo, de la naturaleza y concentración de la especie que se está difundiendo, de la estructura cristalina, de la composición de la matriz, de la estequiometría y de los defectos puntuales.
- El fomento o la limitación del proceso de difusión forma la base de muchas tecnologías importantes. Los ejemplos incluyen el procesamiento de semiconductores, tratamientos térmicos de materiales metálicos, sinterización de cerámicas y metales en polvo, formación de materiales amorfos, solidificación de materiales fusionados durante un proceso de colado, enlazamiento por difusión, plásticos, películas y recubrimientos de barrera.
- Las leyes de Fick describen el proceso de difusión de manera cuantitativa. La primera ley de Fick define la relación entre el gradiente del potencial químico y el flujo de la especie que se está difundiendo. La segunda ley de Fick describe la variación de la concentración de la especie que se está difundiendo bajo condiciones de difusión de estado no estacionario.
- Para un sistema en particular, la cantidad de la difusión está relacionada con el término Dt . Este término permite determinar el efecto de un cambio en la temperatura sobre el tiempo requerido para el proceso controlado por difusión.
- Los dos mecanismos importantes para el movimiento atómico en los materiales cristalinos son la difusión por vacancia y la difusión intersticial. Los átomos sustitucionales en los materiales cristalinos se mueven por medio del mecanismo por vacancias.
- La velocidad de difusión está regida por la relación de Arrhenius, es decir, la velocidad aumenta de manera exponencial con la temperatura. La difusión es particularmente significativa a temperaturas por encima de casi 0.4 veces de la temperatura de fusión (en Kelvin) del material.

- La energía de activación Q describe la facilidad con la que los átomos se difunden, con una difusión rápida que ocurre para una energía de activación baja. Se obtienen una energía de activación baja y una velocidad de difusión rápida para (1) la difusión intersticial en comparación con la difusión por vacancia, (2) estructuras cristalinas con un factor de empaquetamiento menor, (3) materiales con una temperatura de fusión baja o un enlazamiento atómico débil y (4) la difusión a lo largo de los límites de los granos o en las superficies.
- El movimiento total de los átomos, o flujo, aumenta cuando el gradiente de concentración y la temperatura se incrementan.
- La difusión de los iones en las cerámicas por lo regular es más lenta que la de los átomos en materiales metálicos. La difusión en las cerámicas también es afectada de manera significativa por la no estequiometría, los dopantes y la posible presencia de fases líquidas durante la sinterización.
- La difusión de los átomos es de importancia primordial debido a que muchas de las técnicas de procesamiento de materiales, como la sinterización, la metalurgia de polvos y el enlazamiento por difusión, requieren de la difusión. Además, muchos de los tratamientos térmicos y de los mecanismos de endurecimiento utilizados para controlar las estructuras y propiedades en los materiales son procesos controlados por la difusión. La estabilidad de la estructura y las propiedades de los materiales durante su uso a temperaturas altas dependen de la difusión.

Glosario

Autodifusión Movimiento al azar de los átomos dentro de un material en esencia puro. No hay un cambio neto en los resultados de la composición.

Carburación Tratamiento térmico para aceros con el fin de endurecer la superficie utilizando una fuente gaseosa o sólida de carbono. El carbono que se difunde en la superficie la hace más dura y más resistente a la abrasión.

Cerámicas conductoras Materiales cerámicos que son buenos conductores de electricidad como resultado de sus portadores de carga iónica y electrónica (electrones, orificios o iones). La zirconia estabilizada y el óxido de indio y estaño son ejemplos de tales materiales.

Coefficiente de difusión (D) Coeficiente dependiente de la temperatura relacionado con la velocidad a la que se difunden los átomos, iones u otra especie. El coeficiente de difusión depende de la temperatura, la composición y la microestructura del material anfitrión y también de la concentración de la especie que se está difundiendo.

Crecimiento anormal de los granos Tipo de crecimiento de los granos observado en los metales y las cerámicas. En este modo del crecimiento de los granos, por lo regular emerge una distribución bimodal del tamaño de los granos a medida que algunos granos se vuelven muy grandes a expensas de los granos más pequeños. Véase "Crecimiento de los granos" y "Crecimiento normal de los granos".

Crecimiento de granos Movimiento de los límites de los granos por la difusión para reducir la cantidad del área de los límites de los granos. Como resultado, los granos pequeños se contraen y desaparecen y otros granos se vuelven más grandes, de manera similar a como algunas burbujas en la espuma del jabón se vuelven más grandes a expensas de las burbujas más pequeñas. En muchas situaciones no es deseable el crecimiento de los granos.

Crecimiento normal de granos Crecimiento de los granos que se lleva a cabo en un esfuerzo para reducir el área de los límites de los granos. Este tipo de crecimiento de los granos se distingue del crecimiento anormal de los granos en que la distribución del tamaño de los granos permanece unimodal pero el tamaño promedio de los granos aumenta de manera estable.

Difusión Flujo neto de átomos, iones u otra especie dentro de un material inducido por la temperatura y el gradiente de concentración.

Difusión intersticial Difusión de átomos pequeños de una posición intersticial a otra en la estructura cristalina.

Difusión por límite de granos Difusión de los átomos a lo largo de los límites de los granos. Ésta es más rápida que la difusión por volumen, debido a que los átomos están menos compactados en los límites de los granos.

Difusión por superficie Difusión de los átomos a lo largo de las superficies, como grietas o superficies de partículas.

Difusión por vacancia Difusión de los átomos cuando un átomo deja una posición de red regular para llenar una vacancia en el cristal. Este proceso crea una nueva vacancia y el proceso continúa.

Difusión por volumen Difusión de los átomos a través del interior de los granos.

Difusividad Otro término para el coeficiente de difusión (D).

Distancia para la difusión Distancia máxima o deseable a la que los átomos deben difundirse; con frecuencia, la distancia entre las localizaciones de las concentraciones máxima y mínima del átomo que se está difundiendo.

Energía de activación Energía requerida para ocasionar que se lleve a cabo una reacción en particular. En la difusión, la energía de activación está relacionada con la energía requerida para mover un átomo de un sitio de red a otro.

Enlazamiento por difusión Técnica de unión en la que se presan dos superficies entre sí a presiones y temperaturas altas. La difusión de los átomos en la interfaz llena los vacíos y produce un enlace fuerte entre las superficies.

Flujo Número de átomos u otra especie que se está difundiendo que pasa a través de un plano de unidad de área por unidad de tiempo. Está relacionado con la velocidad a la que la masa es transportada por la difusión en un sólido.

Fuerza impulsora Causa que induce un efecto. Por ejemplo, un incremento en el gradiente en la composición aumenta la difusión; de manera similar la reducción en el área de superficie de las partículas de polvo es la fuerza impulsora para la sinterización.

Gradiente de concentración Velocidad del cambio de composición con la distancia en un material no uniforme, por lo general se expresa en $\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}}$ o $\frac{\% \text{at}}{\text{cm}}$.

Interdifusión Difusión de átomos diferentes en direcciones opuestas. La interdifusión puede producir con el tiempo una concentración de equilibrio de los átomos dentro del material.

Metalurgia de polvos Método para la producción de partes metálicas monolíticas; los polvos metálicos se compactan para lograr una forma deseada, la cual se calienta a fin de permitir la difusión y se sinteriza para unir los polvos en una masa sólida.

Nitruración Proceso en el que se difunde nitrógeno en la superficie de un material, como un acero, lo que conduce al incremento de la dureza y la resistencia al desgaste.

Par de difusión Combinación de elementos involucrados en los estudios de la difusión (por ejemplo, si se está considerando la difusión de Al en Si, entonces el Al-Si es un par de difusión).

Permeabilidad Medida relativa de la velocidad de difusión en materiales, con frecuencia aplicada a plásticos y recubrimientos. A menudo se utiliza como un parámetro de diseño en la ingeniería que describe la efectividad de un material en particular para servir como una barrera contra la difusión.

Prensado en caliente Proceso de sinterización conducido bajo una presión uniaxial, utilizado para lograr densidades mayores.

Prensado isostático en caliente Proceso de sinterización en el que se aplica una presión uniforme en todas las direcciones durante la sinterización. Este proceso se utiliza para obtener densidades muy altas y propiedades isotrópicas.

Primera ley de Fick Ecuación que relaciona el flujo de átomos por la difusión con el coeficiente de difusión y el gradiente de concentración.

Recubrimientos de barrera térmicos (RBT) Recubrimientos utilizados para proteger un componente del calor. Por ejemplo, algunas de los álabes de la turbina en un motor de avión se hacen de superaleaciones basadas en níquel y se recubren con zirconia estabilizada con itria (YSZ).

Segunda ley de Fick Ecuación diferencial parcial que describe la velocidad a la que los átomos se redistribuyen en un material por medio de la difusión. Existen muchas soluciones para la segunda ley de Fick; la ecuación 5-7 es una solución posible.

Sinterizado Tratamiento a temperaturas altas utilizado para unir partículas pequeñas. La difusión de los átomos a los puntos de contacto provoca que se formen puentes entre las partículas. La difusión posterior llena con el tiempo cualquier vacío restante. La fuerza impulsora para el sinterizado es una reducción en el área de superficie total de las partículas de polvo.

Sinterizado en fase líquida Proceso de sinterización en el que se forma una fase líquida. Dado que la difusión es más rápida en los líquidos, si la fase líquida puede mojar los granos, puede acelerar el proceso de sinterización.

Problemas

Sección 5-1 Aplicaciones de la difusión

- 5-1** ¿Cuál es la fuerza impulsora para la difusión?
- 5-2** En el tratamiento de carburación de aceros, ¿cuáles son las especies que se están difundiendo?
- 5-3** ¿Por qué se utiliza el plástico PET para fabricar botellas de bebidas carbonatadas?
- 5-4** ¿Por qué a pesar de que el metal aluminio se oxida con mayor rapidez que el hierro se considera como un metal que por lo regular no se “corroe”?
- 5-5** ¿Qué es un recubrimiento de barrera térmica? ¿Dónde se emplean tales recubrimientos?

Sección 5-2 Estabilidad de átomos y iones

- 5-6** ¿Qué es un tratamiento químico de nitruración?
- 5-7** Cierta componente mecánico se trata de manera térmica utilizando carburación. Un problema de ingeniería común encontrado es que se necesita maquinariar cierta parte del componente y esta parte de la superficie no debe endurecerse. Explique cómo se puede lograr este objetivo.
- 5-8** Escriba la ecuación de Arrhenius y explique los diferentes términos.
- 5-9** Se encuentra que los átomos se mueven de una posición de red a otra a una velocidad de $5 \times 10^5 \frac{\text{saltos}}{\text{s}}$ a 400°C cuando la energía de activación para su movimiento es de $30\,000\text{ cal/mol}$. Calcule la velocidad de los saltos a 750°C .
- 5-10** El número de vacancias en un material se relaciona con la temperatura por medio de una ecuación de Arrhenius. Si la fracción de puntos de red que contienen vacancias es de 8×10^{-5} a 600°C , determine la fracción de puntos de red que contienen vacancias a 1000°C .
- 5-11** La ecuación de Arrhenius fue desarrollada originalmente para comparar las velocidades de las reacciones químicas. Compare las velocidades de una reacción química a 20 y 100°C calculando la razón de las velocidades de las reacciones químicas. Suponga que la energía de activación para los líquidos en la que se conduce la reacción química es de 10 kJ/mol y que la reacción está limitada por la difusión.

Sección 5-3 Mecanismos para la difusión

- 5-12** ¿Cuáles son los distintos mecanismos para la difusión?

- 5-13** ¿Por qué la energía de activación para la difusión por medio del mecanismo intersticial es menor que las de otros mecanismos?
- 5-14** ¿Cómo se verifica de manera experimental la autodifusión de los átomos?
- 5-15** Compare los coeficientes de difusión del carbono en hierro CCCu y CCCa a la temperatura de transformación alotrópica de 912°C y explique la diferencia.
- 5-16** Compare los coeficientes de difusión para el hidrógeno y el nitrógeno en hierro CCCa a $1\,000^\circ\text{C}$ y explique la diferencia.

Sección 5-4 Energía de activación para la difusión

- 5-17** La energía de activación en ocasiones se expresa como (eV/átomo). Por ejemplo, vea la figura 5-15 que ilustra los coeficientes de difusión de los iones en distintos óxidos. Convierta eV/átomo a joules/mol.
- 5-18** El coeficiente de difusión para el Cr^{+3} en Cr_2O_3 es de $6 \times 10^{-15}\text{ cm}^2/\text{s}$ a 727°C y de $1 \times 10^{-9}\text{ cm}^2/\text{s}$ a 1400°C . Calcule
- la energía de activación y
 - la constante D_0 .
- 5-19** El coeficiente de difusión para el O^{-2} en el Cr_2O_3 es de $4 \times 10^{-15}\text{ cm}^2/\text{s}$ a 1150°C y de $6 \times 10^{-11}\text{ cm}^2/\text{s}$ a 1715°C . Calcule
- la energía de activación y
 - la constante D_0 .
- 5-20** Sin referirse a la información real, ¿puede predecir si la energía de activación para la difusión del carbono en hierro CCCa es mayor o menor que la del hierro CCCu? Explique.

Sección 5-5 Velocidad de difusión (primera ley de Fick)

- 5-21** Escriba la primera ley de Fick de la difusión. Explique de manera clara qué significa cada término.
- 5-22** ¿Cuál es la diferencia entre la difusividad y el coeficiente de difusión?
- 5-23** Se utiliza una hoja de hierro CCCu de 1 mm de grosor para separar una región de una concentración alta de gas nitrógeno de 0.1 porcentaje atómico de una región de concentración baja de gas nitrógeno a 650°C . Si el flujo del

nitrógeno a través de la hoja es de 10^{12} átomos/(cm²·s), ¿cuál es la concentración de nitrógeno en la región de concentración baja?

- 5-24** Una oblea de silicio de 0.2 mm de grosor se trata de tal manera que se produce un gradiente de concentración uniforme del antimonio. Una superficie contiene 1 átomo de Sb por 10^8 átomos de Si y la otra superficie contiene 500 átomos de Sb por 10^8 átomos de Si. El parámetro de red para el Si es de 5.4307 Å (apéndice A). Calcule el gradiente de concentración en

- el porcentaje atómico de Sb por cm y
- Sb $\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}}$.

- 5-25** Cuando se solidifica una aleación de Cu-Zn, una porción de la superficie contiene un porcentaje atómico de 25 de zinc y la otra porción a 0.025 mm contiene un porcentaje atómico de 20 de zinc. El parámetro de red para la aleación CCCa es alrededor de 3.63×10^{-8} cm. Determine el gradiente de concentración en

- el porcentaje atómico de Zn por cm,
- el porcentaje en peso de Zn por cm y
- Zn $\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}}$.

- 5-26** Se utiliza una hoja de hierro CCCu de 0.001 pulg para separar un contenido alto de gas hidrógeno de un contenido bajo de gas hidrógeno a 650 °C. Hay 5×10^8 átomos de H/cm³ en equilibrio en un lado de la hoja y hay 2×10^3 átomos de H/cm³ en equilibrio en el otro lado. Determine

- el gradiente de concentración del hidrógeno y
- el flujo del hidrógeno a través de la hoja.

- 5-27** Se utiliza una hoja de hierro CCCa de 1 mm de grosor para contener nitrógeno en un intercambiador de calor a 1200 °C. La concentración del N en una superficie es un porcentaje atómico de 0.04 y la concentración en la segunda superficie es de un porcentaje atómico de 0.005. Determine el flujo del nitrógeno a través de la hoja en átomos de N/(cm² · s).

- 5-28** Un contenedor esférico de 4 cm de diámetro y 0.5 mm de grosor hecho de hierro CCCu mantiene nitrógeno a 700 °C. La concentración en la superficie interna es de un porcentaje atómico de 0.05 y en la superficie externa es de un porcentaje atómico de 0.002. Calcule el número de gramos de nitrógeno que se pierden del contenedor por hora.

- 5-29** Se va a fabricar una estructura de hierro CCCu que no permita más que una pérdida de 50 g

de hidrógeno por año a través de cada centímetro cuadrado del hierro a 400 °C. Si la concentración del hidrógeno en una superficie es de 0.05 átomos de H por celda unitaria y de 0.001 átomos de H por celda unitaria en la segunda superficie, determine el grosor mínimo del hierro.

- 5-30** Determine la temperatura máxima permisible que producirá un flujo menor a 2 000 átomos de H/(cm² · s) a través de una hoja de hierro CCCu cuando el gradiente de concentración es de $-5 \times 10^{16} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}}$. (Observe el signo negativo para el flujo.)

Sección 5-6 Factores que afectan la difusión

- 5-31** Escriba la ecuación que describe la dependencia de D en la temperatura.

- 5-32** En los sólidos, el proceso de difusión de los átomos y iones toma tiempo. Explique cómo se aprovecha esto mientras se forman vidrios metálicos.

- 5-33** ¿Por qué se forman vidrios inorgánicos en el enfriamiento relativamente lento de productos fundidos, mientras que se necesita la solidificación rápida para formar vidrios metálicos?

- 5-34** Utilice la información de la difusión en la tabla de abajo para átomos en hierro con el fin de responder las siguientes preguntas. Suponga condiciones de equilibrio metaestables y cantidades muy pequeñas del C en Fe. La constante de los gases en unidades SI es de 8.314 J/(mol · K).

Par de difusión	Mecanismo de difusión	Q (J/mol)	D_0 (m ² /s)
C en hierro CCCa	Intersticial	1.38×10^5	2.3×10^{-5}
C en hierro CCCu	Intersticial	8.74×10^4	1.1×10^{-6}
Fe en hierro CCCa	Por vacancia	2.79×10^5	6.5×10^{-5}
Fe en hierro CCCu	Por vacancia	2.46×10^5	4.1×10^{-4}

- Grafique el coeficiente de difusión como una función del inverso de la temperatura ($1/T$) que muestre los cuatro pares de difusión en la tabla.
- Recuerde que las temperaturas para las transiciones de fases en el hierro, y para cada caso, indican en la gráfica el intervalo de temperaturas a las que la información de la difusión es válida.
- ¿Por qué la energía de activación para la difusión del Fe es mayor que la de la difusión del C en hierro?

- d) ¿Por qué la energía de activación para la difusión es mayor en el hierro CCCa cuando se compara con el hierro CCCu?
- e) ¿El C se difunde más rápido en el Fe CCCa que en el Fe CCCu? Fundamente su respuesta con un cálculo numérico y enuncie cualquier suposición realizada.

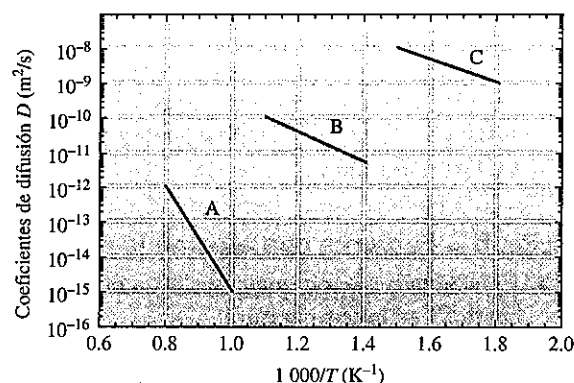


Figura 5-25 Gráfica para los problemas 5-34 y 5-35.

- 5-35** La gráfica anterior tiene tres líneas que representan la autodifusión por límites de los granos, por superficie y por volumen en un metal. Una las líneas etiquetadas A, B y C con el tipo de difusión. Justifique su respuesta calculando la energía de activación para la difusión en cada caso.

Sección 5-7 Permeabilidad de los polímeros

- 5-36** ¿Qué son los polímeros de barrera?
- 5-37** ¿Qué factores, distintos en la permeabilidad, son importantes en la selección de un polímero para la fabricación de botellas de plástico?
- 5-38** El PET amorfo es más permeable al CO_2 que el PET que contiene microcristalitos. Explique por qué.

Sección 5-8 Perfil de composición (segunda ley de Fick)

- 5-39** Los transistores se fabrican dopando silicio monocristalino con distintos tipos de impurezas para generar regiones del tipo *n* y *p*. El fósforo (P) y el boro (B) son especies dopantes comunes del tipo *n* y *p*, respectivamente. Suponiendo que se utiliza un tratamiento térmico a 1100°C durante 1 h para ocasionar la difusión de los dopantes, calcule la concentración constante de la superficie del P y el B necesaria con el fin de alcanzar una concentra-

ción de 10^{18} átomos/ cm^3 a una profundidad de $0.1\ \mu\text{m}$ de la superficie para las regiones del tipo *n* y *p*. Los coeficientes de difusión del P y el B en un silicio monocristalino a 1100°C son de $6.5 \times 10^{-13}\ \text{cm}^2/\text{s}$ y de $6.1 \times 10^{-13}\ \text{cm}^2/\text{s}$, respectivamente.

- 5-40** Considere una oblea de silicio (Si) de 2 mm de grosor que se va a dopar utilizando antimonio (Sb). Suponga que la fuente del dopante (mezcla gaseosa de cloruro de antimonio y otros gases) provee una concentración constante de 10^{22} átomos/ m^3 . Se necesita un perfil del dopante tal que la concentración de Sb a una profundidad de 1 micrómetro sea de 5×10^{21} átomos/ m^3 , ¿cuál es el tiempo requerido para el tratamiento térmico de la difusión? Suponga que la oblea de silicio con la que se comienza no contiene impurezas o dopantes. Suponga que la energía de activación para la difusión del Sb en silicio es de $380\ \text{kJ/mol}$ y el D_0 para la difusión del Sb en Si es de $1.3 \times 10^{-3}\ \text{m}^2/\text{s}$. Suponga que $T = 1250^\circ\text{C}$.

- 5-41** Considere el dopado del Si con galio (Ga). Suponga que el coeficiente de difusión del galio en Si a 1100°C es de $7 \times 10^{-13}\ \text{cm}^2/\text{s}$. Calcule la concentración del Ga a una profundidad de 2.0 micrómetros si la concentración del Ga en la superficie es de 10^{23} átomos/ cm^3 . Los tiempos de difusión son de 1, 2 y 3 horas.
- 5-42** Compare la velocidad a la que los iones oxígeno se difunden en la alúmina (Al_2O_3) con la velocidad a la que los iones aluminio se difunden en la Al_2O_3 a 1500°C . Explique la diferencia.
- 5-43** Se lleva a cabo un proceso de carburación en un acero con 0.10% C introduciendo 1.0% C en la superficie a 980°C , donde el hierro es CCCa. Calcule el contenido de carbono a 0.01 cm, 0.05 cm y 0.10 cm debajo de la superficie después de 1 h.
- 5-44** Se calienta a 912°C un hierro que contiene 0.05% C en una atmósfera que produce 1.20% C en la superficie y se mantiene durante 24 h. Calcule el contenido de carbono a 0.05 cm debajo de la superficie si
- el hierro es CCCu y
 - el hierro es CCCa. Explique la diferencia.
- 5-45** ¿Qué temperatura se requiere para obtener 0.50% C a una distancia de 0.5 mm debajo de la superficie de un acero con 0.20% C en 2 h, cuando está presente 1.10% C en la superficie? Suponga que el hierro es CCCa.

- 5-46** Se va a carburizar un acero con 0.15% C a 1100 °C, lo que da 0.35% C a una distancia de 1 mm debajo de la superficie. Si la composición de la superficie se mantiene a 0.90% C, ¿qué tiempo se requiere?
- 5-47** Se va a carburizar un acero con 0.02% C a 1200 °C en 4 h, con el contenido de carbono 0.6 mm debajo de la superficie que alcanza 0.45% C. Calcule el contenido de carbono requerido en la superficie del acero.
- 5-48** Una herramienta de acero con 1.2% C mantenida a 1150 °C se expone a oxígeno durante 48 h. El contenido de carbono en la superficie del acero es cero. ¿A qué profundidad se descarburiza el acero a menos de 0.20% C?
- 5-49** Un acero con 0.80% C debe operar a 950 °C en un ambiente oxidante para el que el carbono contenido en la superficie del acero sea cero. Sólo los 0.02 cm de la parte más externa del acero pueden bajar de 0.75% C. ¿Cuál es el tiempo máximo que puede operar esa parte de acero?
- 5-50** Un acero con estructura cristalina CCCu que contiene 0.001% N se nitrura a 550 °C durante 5 h. Si el nitrógeno contenido en la superficie del acero es de 0.08%, determine el nitrógeno contenido a 0.25 mm de la superficie.
- 5-51** ¿Qué tiempo se requiere para nitrurar un acero con 0.002% N para obtener 0.12% N a una distancia de 0.002 pulg debajo de la superficie a 625 °C? El contenido de nitrógeno en la superficie es de 0.15%.
- 5-52** Se puede desarrollar de manera exitosa un tratamiento térmico de carburación a 1 200 °C en 1 h. En un esfuerzo para reducir el costo de reemplazar el revestimiento de los ladrillos en el horno, se propone reducir la temperatura de carburación a 950 °C. ¿Qué tiempo se requerirá para obtener un tratamiento de carburación similar?
- 5-53** Durante la solidificación de una aleación de Cu-Zn, se encuentra que la composición no es uniforme. Al calentar la aleación a 600 °C durante 3 h, la difusión del zinc ayuda a hacer más uniforme la composición. ¿Qué temperatura se requeriría si se desea desarrollar este tratamiento de homogenización en 30 minutos?
- 5-54** Para controlar la profundidad de la unión en los transistores, se introducen cantidades precisas de impurezas a profundidades relativamente superficiales por medio de la implantación de iones y se difunden en el sustrato de silicio en un tratamiento térmico subsecuente. Esto

puede aproximarse como un problema de difusión con una fuente finita. Aplicando las condiciones limitantes apropiadas, la solución a la segunda ley de Fick en estas condiciones es

$$c(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right),$$

donde Q es la concentración inicial en la superficie con unidades de átomos/cm². Suponga que se implantan 10¹⁴ átomos/cm² de fósforo en la superficie de la oblea de silicio con una concentración del boro de fondo de 10¹⁶ átomos/cm³ y esta oblea se recoce de manera subsecuente a 1100 °C. El coeficiente de difusión (D) del fósforo en silicio a 1 100 °C es de 6.5×10^{-13} cm²/s.

- Trace una gráfica de la concentración c (átomos/cm³) en función de x (cm) para un tiempo de recocido de 5, 10 y 15 minutos.
- ¿Cuál es el tiempo de recocido requerido para que la concentración del fósforo sea igual a la concentración del boro a una profundidad de 1 μm?

Sección 5-9 Difusión y procesamiento de materiales

- 5-55** Organice los siguientes materiales en orden ascendente de su coeficiente de autodifusión: gas Ar, agua, aluminio monocristalino y aluminio líquido a 700 °C.
- 5-56** La mayoría de los metales y aleaciones pueden procesarse utilizando la ruta de fusión y colado, pero por lo regular no se aplica este método para el procesamiento de metales específicos (por ejemplo, W) y de la mayoría de las cerámicas. Explique.
- 5-57** ¿Qué es el sinterizado? ¿Cuál es la fuerza impulsora para el sinterizado?
- 5-58** ¿Por qué ocurre el crecimiento de los granos? ¿A qué se refiere con los términos crecimiento normal y anormal de los granos?
- 5-59** ¿Por qué se espera que la resistencia de muchos materiales metálicos disminuya con el incremento del tamaño de los granos?
- 5-60** Una parte cerámica hecha de MgO se sinteriza de manera exitosa a 1700 °C en 90 minutos. Para minimizar los esfuerzos térmicos durante este proceso, se planea reducir la temperatura a 1 500 °C. ¿Qué limitará la velocidad a la que la sinterización puede realizarse: la difusión de los iones magnesio o la difusión de los iones

oxígeno? ¿Qué tiempo se requerirá a la temperatura más baja?

- 5-61** Una aleación de Cu-Zn tiene un diámetro de grano inicial de 0.01 mm. La aleación se calienta a varias temperaturas, lo que permite que se lleve a cabo el crecimiento de los granos. Los tiempos requeridos para que los granos crezcan a un diámetro de 0.30 mm se muestran abajo.

Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)
500	80 000
600	3 000
700	120
800	10
850	3

Determine la energía de activación para el crecimiento de los granos. ¿Está correlacionada con la difusión del zinc en cobre? (*Sugerencia:* Observe que la velocidad es el recíproco del tiempo.)

- 5-62** ¿Cuáles son las ventajas del uso del prensado en caliente y el prensado isostático en caliente en comparación con el uso de la sinterización normal?
- 5-63** Se enlaza por difusión una hoja de oro a una hoja de plata en 1 h a 700 °C. A 500 °C se requieren 440 h para obtener el mismo grado de enlazamiento, y a 300 °C, se requieren 1530 años para el enlazamiento. ¿Cuál es la energía de activación para el proceso de enlazamiento por difusión? ¿Cuál parece que controla la velocidad del enlazamiento: la difusión del oro o la difusión de la plata? (*Sugerencia:* Observe que la velocidad es el recíproco del tiempo.)



Problemas de diseño

- 5-64** Diseñe un tanque esférico, con una pared de 2 cm de grosor que asegure que no se perderán más de 50 kg de hidrógeno por año. El tanque, el cual operará a 500 °C, puede fabricarse de níquel, aluminio, cobre o hierro. El coeficiente de difusión del hidrógeno y el costo por kg para cada material disponible se enlistan aquí.

Datos

de la difusión
en el material

	D_0 (cm ² /s)	Q (cal/mol)	Costo (\$/lb)
Níquel	0.0055	8 900	4.10
Aluminio	0.16	10 340	0.60
Cobre	0.011	9 380	1.10
Hierro (BCC)	0.0012	3 600	0.15

- 5-65** Un engranaje de acero que inicialmente contiene 0.10% C se va a carburizar de tal manera que el contenido de carbono a una profundidad de 0.05 pulg sea de 0.50% C. Se puede generar un gas para la carburación en la superficie que contenga en cualquier parte de 0.95% C a 1.15% C. Diseñe un tratamiento térmico de carburación apropiado.

- 5-66** Cuando una válvula colada que contiene cobre y níquel se solidifica bajo condiciones sin equilibrio, se encuentra que la composición de la aleación varía de manera sustancial sobre una distancia de 0.005 cm. Por lo regular es posible eliminar esta diferencia en las concentraciones calentando la aleación durante 8 h a 1200 °C; sin embargo, en ocasiones este tratamiento ocasiona que la aleación comience a fusionarse, destruyendo la parte. Diseñe un tratamiento térmico que elimine la no uni-formidad sin fusión. Suponga que el costo de operación del horno por hora se duplica por cada incremento de 100 °C en la temperatura.

- 5-67** Suponga que la concentración en la superficie del fósforo (P) que se está difundiendo en Si es de 10^{21} átomos/cm³. Se necesita diseñar un proceso conocido como etapa de predeposición, de tal manera que la concentración del P (c_1 para la etapa 1) a una profundidad de 0.25 micrómetros sea de 10^{13} átomos/cm³. Suponga que ésta se conduce a una temperatura de 1000 °C y que el coeficiente de difusión del P en Si a esta temperatura es de 2.5×10^{-14} cm²/s. Suponga que el proceso se lleva a cabo durante un tiempo total de 8 minutos. Calcule el perfil de la concentración (es decir, c_1 como una función de la profundidad, lo cual en este caso está dado por la siguiente ecuación). Observe el uso de la función de error complementaria.

$$c_1(x, t_1) = c_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{4Dt} \right) \right]$$

Utilice diferentes valores de x para generar y graficar este perfil de P durante la etapa de predeposición.



Problemas de cómputo

- 5-68** *Cálculo de los coeficientes de difusión.* Escriba un programa de cómputo que le pida al usuario que provea la información para la energía de activación Q y el valor de D_0 . El programa

debe pedirle al usuario que introduzca un intervalo válido de temperaturas. El programa, cuando se ejecuta, provee los valores de D como una función de la temperatura en incrementos elegidos por el usuario. El programa debe convertir Q , D_0 y la temperatura a las unidades apropiadas. Por ejemplo, si el usuario provee temperaturas en $^{\circ}\text{F}$, el programa debe reconocer esto y convertir la temperatura a K. El programa también debe presentar una declaración preventiva acerca de las suposiciones estándares hechas. Por ejemplo, el programa debe prevenir al usuario qué efectos de cualquier cambio posible en la estructura cristalina en el intervalo de temperaturas especificado no se toman en cuenta. Compruebe la validez de sus programas utilizando los ejemplos en el libro y también otros problemas que puede haber resuelto utilizando una calculadora.

5-69 *Comparación de las velocidades de reacción.* Escriba un programa de cómputo que le pedirá al usuario que introduzca la energía de activación para una reacción química. El programa debe pedirle al usuario que provea dos temperaturas a las que necesitan compararse las velocidades de reacción. Utilizando el valor de la constante de los gases y la energía de activación, el programa debe proveer una razón de las velocidades de reacción. El programa debe tomar en cuenta las distintas unidades para la energía de activación.

5-70 *Tratamiento térmico de carburación.* El programa debe pedirle al usuario que provea una entrada para la concentración del carbono en la superficie (c_s) y la concentración del carbono en el volumen (c_0). El programa también debe pedirle al usuario que provea la temperatura y un valor de D (o valores para D_0 y Q , que permitirán que se calcule D). El programa debe proveer una salida del perfil de la concentración en forma de tabla. La distancia a la

que se van a determinar las concentraciones del carbono pueden ser proporcionadas por el usuario o definidas por la persona que escriba el programa. El programa también debe ser capaz de manejar el cálculo de los tiempos del tratamiento térmico si el usuario provee un nivel de la concentración que se necesita a una profundidad específica. Este programa requerirá el cálculo de la función de error. El lenguaje de programación u hoja de cálculo que utilice puede incorporar una función que calcule la función de error. Si éste es el caso, utilice esa función. También puede calcular la función de error como la expansión de la siguiente serie:

$$\text{erf}(z) = 1 - \frac{e^{-z^2}}{\sqrt{\pi}z} \left(1 - \frac{1}{2z^2} - \frac{1*3}{(2z^2)^2} + \frac{1*3*5}{(2z^2)^3} + \dots \right)$$

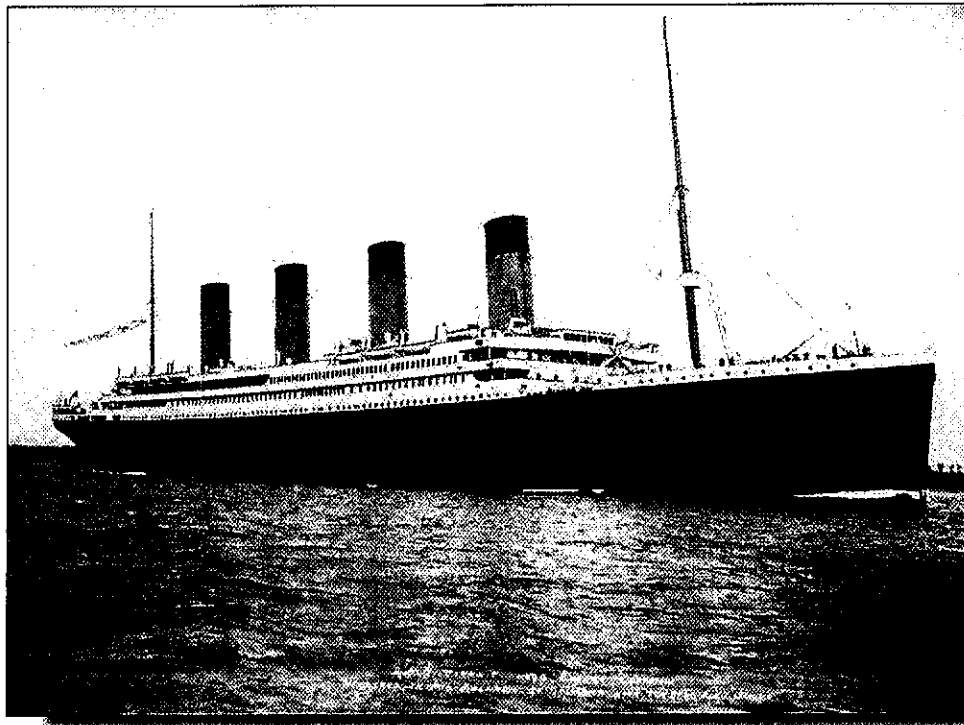
o utilizar una aproximación

$$\text{erf}(z) = 1 - \left(\left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \right] \frac{e^{-z^2}}{z} \right)$$

En estas ecuaciones, z es el argumento de la función de error. También, en ciertas situaciones, conocerá el valor de la función de error (si se proveen todas las concentraciones) y tendrá que calcular el argumento de la función de error. Esto puede manejarse haciendo que una parte del programa compare los distintos valores para el argumento de la función de error y minimizando la diferencia entre el valor de la función de error que requiere y el valor de la función de error que se aproximó.

Knovel® Problemas

K5-1 Compare las permeabilidades al dióxido del carbono de las películas de polietileno de baja densidad (LDPE), polipropileno y tereftalato de polietileno (PET) a temperatura ambiente.



© F.G.O. Stuart

Algunos materiales pueden volverse quebradizos cuando las temperaturas son bajas y/o las velocidades de deformación son altas. La química especial del acero utilizado en el *Titanic* y las tensiones asociadas con la fabricación y al resquebrajamiento de este acero cuando se le sometió a temperaturas bajas se han identificado como factores que contribuyeron a la falla del casco del barco.

Propiedades mecánicas: primera parte

¿Se ha preguntado alguna vez?

- ¿Por qué *Silly Putty*® puede estirarse una cantidad considerable cuando se jala de manera lenta, pero se parte en dos cuando se jala rápido?
- ¿Por qué se puede cargar el peso de un camión de bomberos sobre cuatro tazas de café de cerámica, sin embargo, las tazas de cerámica tienden a romperse con facilidad cuando se dejan caer al suelo?
- ¿Qué factores relacionados con los materiales desempeñaron una función importante en el hundimiento del *Titanic*?
- ¿Qué factores desempeñaron una función importante en el accidente en 1986 del transbordador *Challenger*?

Las propiedades mecánicas de los materiales dependen de su composición y microestructura. En los capítulos 2, 3 y 4, se aprendió que la composición de un material, la naturaleza del enlace, la estructura cristalina y los defectos (como dislocaciones, límites de los granos, etc.) tienen una influencia profunda en la resistencia y ductilidad de los materiales metálicos. En este capítulo, se comenzarán a evaluar otros factores que afectan las propiedades mecánicas de los materiales, por ejemplo, cómo las temperaturas más bajas pueden ocasionar que muchos metales y plásticos se vuelvan quebradizos. Las temperaturas más bajas contribuyeron a que se quebraran los plásticos utilizados para los anillos selladores en los cohetes propulsores compactos, que ocasionaron el accidente del *Challenger* en 1986. En 2003, se perdió el transbordador *Columbia* debido a un impacto de residuos sobre las losetas cerámicas y a la falla de los compuestos carbono-carbono. De manera similar, la química especial del acero utilizado en el *Titanic* y los esfuerzos asociados con la fabricación y el resquebrajamiento de este acero cuando fue sometido a temperaturas bajas se han identificado como los factores que contribuyeron a la falla del casco del barco. Algunos investigadores han mostrado que remaches débiles y fallas en el diseño también contribuyeron a la falla.

El objetivo principal de este capítulo es la introducción de los conceptos básicos asociados con las propiedades mecánicas. Se aprenderán términos básicos como dureza, esfuerzo, deformación, deformación elástica y plástica, viscoelasticidad y rapidez o velocidad de deformación. También se repasarán algunos de los procedimientos de prueba básicos que los ingenieros utilizan para evaluar muchas de estas propiedades. Estos conceptos se explicarán utilizando ilustraciones de aplicaciones en el mundo real.

6-1 Importancia tecnológica

En muchas de las tecnologías emergentes actuales, el énfasis principal está en las propiedades mecánicas de los materiales utilizados. Por ejemplo, en la fabricación de aviones, las aleaciones de aluminio o los compuestos reforzados con carbono empleados para los componentes del avión deben ser ligeros, resistentes y capaces de soportar la carga mecánica cíclica por un periodo largo y predecible. Los aceros utilizados en la construcción de estructuras como edificios y puentes deben tener la resistencia adecuada para que estas estructuras puedan construirse sin comprometer la seguridad. Los plásticos utilizados para la fabricación de tuberías, válvulas, baldosas y similares también deben poseer una resistencia mecánica adecuada. Los materiales como el grafito pirolítico o las aleaciones de tungsteno, cromo y cobalto, utilizados para válvulas cardíacas prostéticas, no deben fallar. De manera similar, el desempeño de las pelotas de béisbol, los bates de críquet, las raquetas de tenis, los palos de golf, los esquís y otro equipo deportivo no sólo depende de la resistencia y peso de los materiales utilizados, sino también de su habilidad para funcionar bajo una carga de "impacto". La importancia de las propiedades mecánicas es fácil de apreciar en muchas de estas aplicaciones de "soporte de carga".

En muchas otras aplicaciones, las propiedades mecánicas de los materiales también desempeñan un papel importante, aun cuando la función primaria sea eléctrica, magnética, óptica o biológica. Por ejemplo, una fibra óptica debe poseer cierto nivel de resistencia para soportar los esfuerzos encontrados en su aplicación. Una aleación de titanio biocompatible utilizada para un implante óseo debe tener la resistencia y la dureza suficientes para sobrevivir en el cuerpo humano por muchos años sin fallar. Un recubrimiento sobre los lentes ópticos debe resistir la abrasión mecánica. Una aleación de aluminio o un sustrato vidrio-cerámico utilizado como una base para la fabricación de discos duros magnéticos debe poseer la suficiente resistencia mecánica para que no se rompa o fisure durante la operación que requiere una rotación a altas velocidades. De manera similar, los empaques electrónicos utilizados para encapsular chips semiconductores y las estructuras de película delgada creadas sobre el chip semiconductor deben ser capaces de soportar los esfuerzos encontrados en varias aplicaciones, al igual que los hallados durante el calentamiento y enfriamiento de los dispositivos electrónicos. La fortaleza mecánica de los dispositivos pequeños utilizando nanotecnología también es importante. Los vidrios flotados utilizados en las aplicaciones automotrices y de construcción deben poseer la resistencia suficiente para que no se rompan. Muchos componentes diseñados a partir de plásticos, metales y cerámicas no sólo deben poseer la dureza y resistencia adecuadas a temperatura ambiente sino también a temperaturas relativamente altas y bajas.

Para las aplicaciones de soporte de carga se seleccionan los materiales de ingeniería comparando sus propiedades mecánicas con las especificaciones de diseño y las condiciones de servicio requeridas del componente. La primera etapa en el proceso de selección requiere un análisis de la aplicación del material para determinar sus características más importantes. ¿Debe ser resistente, rígido o dúctil? ¿Estará sujeto a una aplicación que involucre un esfuerzo alto o una fuerza intensa repentina, un esfuerzo alto a una temperatura elevada, esfuerzos cíclicos, condiciones corrosivas o abrasivas? Una vez que se conocen las propiedades requeridas, se puede realizar una selección preliminar del material apropiado utilizando varias bases de datos. Sin embargo, se debe conocer cómo se obtuvieron las propiedades enlistadas en el manual, conocer qué significan las propiedades y comprender que las propiedades enlistadas se obtienen a partir de pruebas idealizadas que pueden no destinarse de manera exacta a aplicaciones de ingeniería en el mundo real. Los materiales con la misma composición química nominal y otras propiedades pueden mostrar propiedades mecánicas significativamente distintas dictaminadas por sus microestructuras. Además, los cambios en la temperatura, la naturaleza cíclica de los esfuerzos aplicados, los cambios químicos debidos a la oxidación, corrosión o erosión; los cambios microestructurales debidos a la temperatura, el efecto de los defectos posibles introducidos durante las operaciones de maquinado (por ejemplo, rectificado, soldado, corte, etc.) u otros factores también pueden tener un efecto trascendental en el comportamiento mecánico de los materiales.

También deben comprenderse las propiedades mecánicas de los materiales para que éstos se puedan procesar en formas útiles empleando técnicas de procesamiento de materiales.

El **procesamiento de materiales** requiere una comprensión detallada de las propiedades mecánicas de los materiales a distintas temperaturas y condiciones de carga. También se debe comprender cómo el procesamiento de los materiales puede cambiar las propiedades de éstos; por ejemplo, al hacer un metal más resistente o más débil de lo que era antes del procesamiento.

En las siguientes secciones se definen los términos que se utilizan para describir las propiedades mecánicas de los materiales de ingeniería. Se explican las distintas pruebas que se utilizan para determinar las propiedades mecánicas de los materiales.

6-2 Terminología de las propiedades mecánicas

Existen distintos tipos de fuerzas o “esfuerzos” que se encuentran al tratar con las propiedades mecánicas de los materiales. En general, se define el **esfuerzo** como la fuerza que actúa por unidad de área sobre la que se aplica la fuerza. En la figura 6-1a) se ilustran los esfuerzos de tensión, compresión y corte. La **deformación unitaria** se define como el cambio en dimensión por unidad de longitud. El esfuerzo por lo regular se expresa en psi (libras por pulgada cuadrada) o en Pa (pascales). La deformación unitaria no tiene dimensiones y con frecuencia se expresa como pulg/pulg o cm/cm.

Los esfuerzos de tensión y de compresión son esfuerzos normales. Un esfuerzo normal surge cuando la fuerza aplicada actúa de manera perpendicular al área de interés. La tensión ocasiona una elongación en la dirección de la fuerza aplicada, mientras que la compresión ocasiona un acortamiento. Se presenta un esfuerzo cortante cuando la fuerza aplicada actúa en una dirección paralela al área de interés. Muchas aplicaciones de soporte de carga involucran esfuerzos de tensión o de compresión. Los esfuerzos cortantes se encuentran con frecuencia en el procesamiento de materiales que utilizan técnicas como la extrusión de polímeros. Los esfuerzos cortantes también se hallan en aplicaciones estructurales. Observe que incluso un esfuerzo de tensión simple aplicado a lo largo de una dirección ocasionará un esfuerzo cortante en las demás direcciones (por ejemplo, vea la ley de Schmid, capítulo 4).

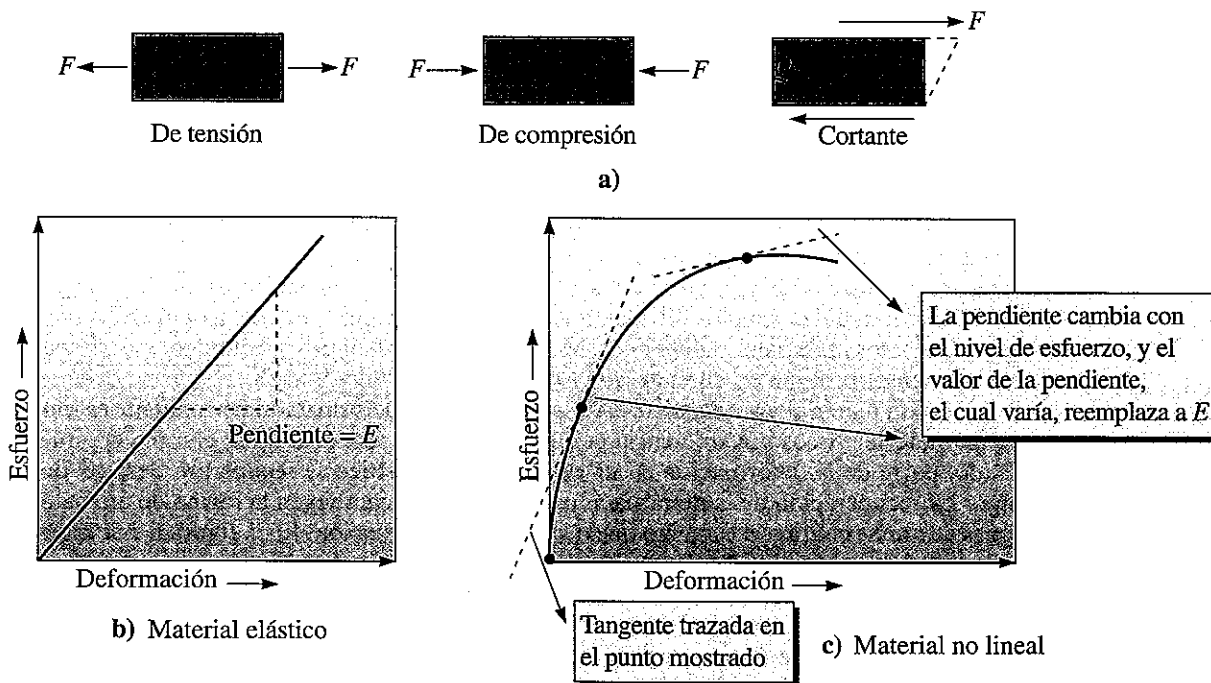


Figura 6-1 a) Esfuerzos de tensión, compresión y corte. F es la fuerza aplicada. b) Ilustración que muestra cómo se define el módulo de Young para un material elástico. c) Para los materiales no lineales, se utiliza la pendiente de una tangente como una cantidad variable que reemplaza al módulo de Young.

La **deformación elástica** se define como la deformación recuperable por completo que resulta a partir de un esfuerzo aplicado. La deformación es “elástica” si se desarrolla de manera instantánea (es decir, la deformación ocurre tan pronto como se aplica la fuerza), permanece mientras se aplique el esfuerzo y se recupera cuando se retira la fuerza. Un material sujeto a una deformación elástica no muestra ninguna deformación permanente (es decir, regresa a su forma original después de que se elimina la fuerza o esfuerzo). Considere el estiramiento de un resorte metálico rígido por un pequeño tiempo para después soltarlo. Si el resorte regresa de inmediato a sus dimensiones originales, la deformación desarrollada en el resorte fue elástica.

En muchos materiales, el esfuerzo elástico y la deformación elástica están relacionados de manera lineal. La pendiente de una curva esfuerzo de tensión-deformación en el régimen lineal define el **módulo de Young** o **módulo de elasticidad** (E) de un material [figura 6-1b)]. Las unidades de E se miden en libras por pulgada cuadrada (psi) o en pascuales (Pa) (las mismas que las del esfuerzo). Se observan deformaciones elásticas grandes en los **elastómeros** (por ejemplo, el hule natural, las siliconas), para los cuales la relación entre la deformación elástica y el esfuerzo es no lineal. En los elastómeros, la gran deformación elástica se relaciona con el enrollado y desenrollado de moléculas parecidas a resortes (capítulo 16). Al tratar con tales materiales, se utiliza la pendiente de la tangente en cualquier valor dado de esfuerzo o deformación y se considera que es una cantidad variable que reemplaza al módulo de Young [figura 6-1c)]. Se define el **módulo cortante** (G) como la pendiente de la parte lineal de la curva esfuerzo cortante-deformación cortante.

A la **deformación plástica** o permanente de un material se le conoce como **deformación plástica**. En este caso, cuando se elimina el esfuerzo, el material *no* regresa a su forma original. ¡Una abolladura en un automóvil es una deformación plástica! Observe que la palabra “plástica” no se refiere aquí a la deformación en un material plástico (polimérico), sino a la deformación permanente en cualquier material.

La rapidez a la que se desarrolla la deformación en un material se define como la **rapidez de deformación**. Las unidades de la rapidez de deformación son s^{-1} . Posteriormente en este capítulo aprenderá que la rapidez a la que un material se deforma es importante desde una perspectiva de las propiedades mecánicas. Muchos materiales considerados como dúctiles se comportan como sólidos quebradizos cuando las rapidezces de deformación son altas. El Silly Putty® (un polímero de silicona) es un ejemplo de tal material. Cuando las rapidezces de deformación son bajas, el Silly Putty® puede mostrar una ductilidad significativa. Cuando se estira de manera rápida (a rapidezces de deformación altas), no se le permite el desenredado ni la extensión de las moléculas grandes de polímero y, por tanto, el material se parte en dos. Cuando los materiales se someten a rapidezces de deformación altas se refiere a este tipo de carga como **carga de impacto**.

Un **material viscoso** es uno en el que se desarrolla la deformación durante un tiempo y el material no regresa a su forma original después de que se elimina el esfuerzo. El desarrollo de la deformación toma tiempo y no está en fase con el esfuerzo aplicado. También, el material permanecerá deformado cuando se elimine el esfuerzo aplicado (es decir, la deformación será plástica). Un material **viscoelástico** (o **anelástico**) puede concebirse como un material con una respuesta entre la de un material viscoso y un material elástico. El término “anelástico” se utiliza por lo regular para los metales, mientras que el término “viscoelástico” se asocia por lo general con los materiales poliméricos. Muchos plásticos (sólidos y fundidos) son viscoelásticos. Un ejemplo común de un material viscoelástico es el Silly Putty®.

En un material viscoelástico, el desarrollo de una deformación permanente es similar al de un material viscoso. A diferencia de un material viscoso, cuando se elimina el esfuerzo aplicado, parte de la deformación en un material viscoelástico se recuperará después de un tiempo. La recuperación de la deformación se refiere a un cambio en la forma de un material después de que se elimina el esfuerzo que ocasiona la deformación. En la figura 6-2 se muestra una descripción cualitativa del desarrollo de la deformación como una función del tiempo en relación con una fuerza aplicada en materiales elásticos, viscosos y viscoelásticos. En los materiales viscoelásticos mantenidos bajo una deformación constante, si se espera, el nivel de la deformación disminuye en un periodo de tiempo. A esto se le conoce como **relajación de esfuerzo**. La recuperación de la deformación y la relajación del esfuerzo son términos distintos y no deben confundirse. Un ejemplo común de relajación de esfuerzo lo proporcionan las cuerdas de nailon en una raqueta de tenis. Se sabe que el nivel de esfuerzo, o la “tensión”, como le llaman los jugadores de tenis, disminuye con el tiempo.

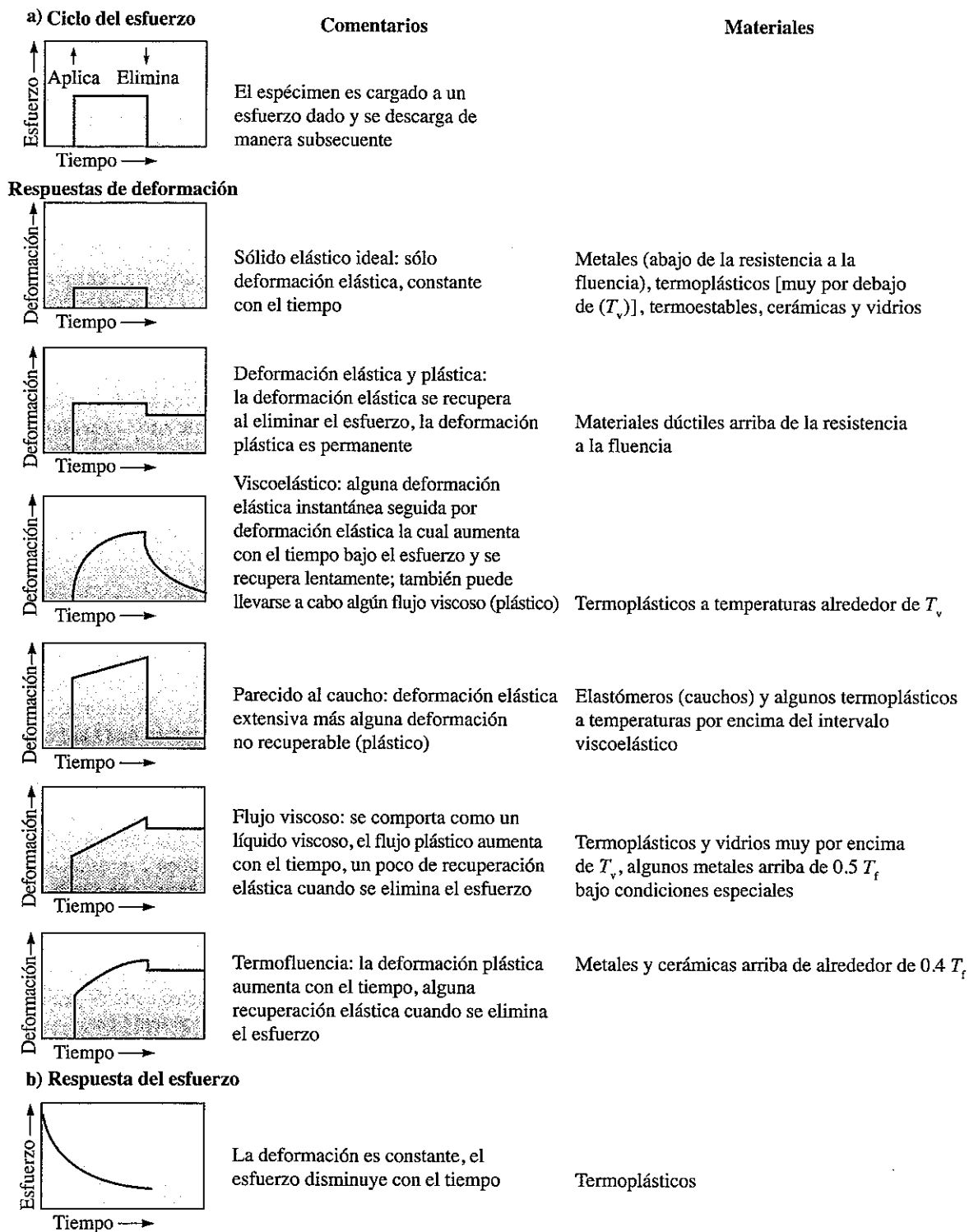


Figura 6-2 a) Varios tipos de respuesta de la deformación a un esfuerzo impuesto, donde T_v = temperatura de transición de vidrio y T_f = punto de fusión. (Reimpresa de Materials Principles and Practice, por C. Newey y G. Weaver (eds.), 1991, p. 300, Fig. 6-9. Copyright © 1991 Butterworth-Heinemann. Reimpresa con permiso de Elsevier Science.) b) Relajación de esfuerzo en un material viscoelástico. Observe que el eje vertical es el esfuerzo. La deformación es constante.

Cuando se trata con materiales fundidos, líquidos y dispersiones, como pinturas o geles, se requiere una descripción de la resistencia al flujo bajo un esfuerzo aplicado. Si la relación entre el esfuerzo cortante aplicado τ y la **rapidez de deformación cortante** ($\dot{\gamma}$) es lineal, se refiere a este material como **newtoniano**. La pendiente del esfuerzo cortante en función de la curva de la rapidez de deformación cortante en estado estacionario se define como la **viscosidad** (η) del material. El agua es un ejemplo de un material newtoniano. La siguiente relación define la viscosidad:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (6-1)$$

Las unidades de η son $\text{Pa} \cdot \text{s}$ (en el sistema SI) o poises (P) o $\frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{s}}$ en el sistema cgs. En algunas ocasiones se utiliza el término centipoises (cP), $1 \text{ cP} = 10^{-2} \text{ P}$. La conversión entre estas unidades está dada por $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ P} = 1000 \text{ cP}$.

La **viscosidad cinemática** (ν) se define como

$$\nu = \eta / \rho \quad (6-2)$$

donde la viscosidad (η) tiene unidades de poises y la densidad (ρ) tiene unidades de g/cm^3 . La unidad de la viscosidad cinemática es el stokes (St) o de manera equivalente cm^2/s . En algunas ocasiones se utiliza la unidad centistokes (cSt); $1 \text{ cSt} = 10^{-2} \text{ St}$.

Para muchos materiales la relación entre el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación cortante es no lineal. Estos materiales son **no newtonianos**. La relación del esfuerzo en función de la rapidez de deformación cortante en estado estacionario en estos materiales puede describirse como

$$\tau = \eta \dot{\gamma}^m \quad (6-3)$$

donde el exponente m es distinto de 1.

Los materiales no newtonianos se clasifican como **adelgazados por corte** (o pseudo-plásticos) o **engrosados por corte** (o dilatantes). En la figura 6-3 se muestran las relaciones entre el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación cortante para distintos tipos de materiales. Si se toma la pendiente de la línea obtenida al unir el origen con cualquier punto en la curva, se determina la **viscosidad aparente** (η_{ap}). En la figura 6-4a) se muestra la viscosidad aparente como una función de la rapidez de deformación cortante en estado estacionario. La viscosidad aparente de un material newtoniano permanecerá constante al cambiar la rapidez de deformación cortante. En los materiales adelgazados por corte, la viscosidad aparente disminuye con el incremento de la rapidez de deformación cortante. En los materiales engrosados por corte, la viscosidad aparente aumenta con el incremento de la rapidez de deformación cor-

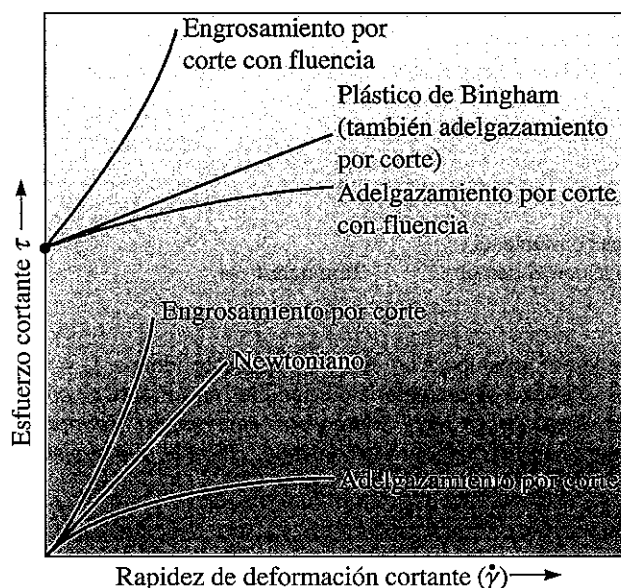


Figura 6-3

Relaciones esfuerzo cortante-rapidez de deformación cortante para materiales newtonianos y no newtonianos.

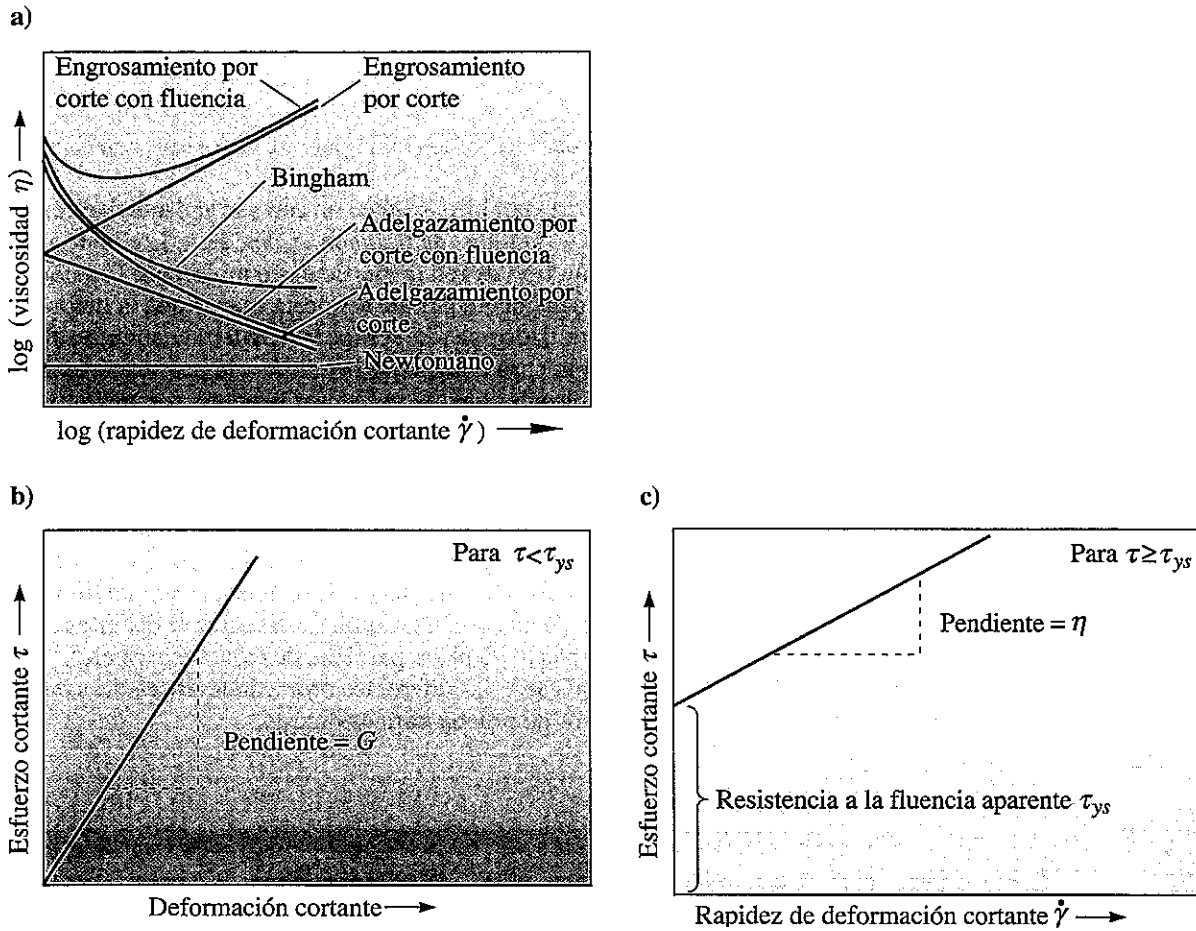


Figura 6-4 a) Viscosidad aparente como una función de la rapidez de deformación cortante ($\dot{\gamma}$). b) y c) Ilustración de un plástico de Bingham (ecuaciones 6-4 y 6-5). Observe que el eje horizontal en b) es el esfuerzo cortante.

tante. Por ejemplo, si tiene una lata de pintura en un almacén, la rapidez o velocidad de deformación cortante a la que está sujeta la pintura es muy pequeña y ésta se comporta como si fuera muy viscosa. Al usarla con una brocha, la pintura está sujeta a una rapidez de deformación cortante alta y se comporta ahora como si fuera bastante delgada o menos viscosa (es decir, exhibe una viscosidad aparente pequeña). Éste es el comportamiento del adelgazamiento por corte. Algunos materiales poseen un comportamiento “plástico ideal”. Para un material con este comportamiento, el esfuerzo cortante no cambia con la rapidez de deformación cortante.

Muchos materiales útiles pueden modelarse como **plásticos de Bingham** y se definen por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\tau = G \cdot \gamma \text{ (cuando } \tau \text{ es menor que } \tau_{r-f}) \quad (6-4)$$

$$\tau = \tau_{r-f} + \eta \dot{\gamma} \text{ (cuando } \tau \geq \tau_{r-f}) \quad (6-5)$$

Esto se ilustra en la figura 6-4b) y 6-4c). En estas ecuaciones τ_{r-f} es la **resistencia a la fluencia** obtenida por medio de la interpolación de la información del esfuerzo cortante-rapidez de deformación cortante con la rapidez de deformación cortante de cero. Se define la resistencia a la fluencia como el nivel de esfuerzo que debe excederse para que el material se deforme de manera plástica. La existencia de una resistencia a la fluencia verdadera (en ocasiones conocida como fluencia) no se ha comprobado sin ambigüedad para muchos plásticos y dispersiones como las pinturas. Para comprobar la existencia de una fluencia, es necesario separar las mediciones del esfuerzo en función de la deformación. Para estos materiales, una deformación crítica de fluencia puede ser una manera mejor de describir el comportamiento mecánico.

Muchas lechadas cerámicas (dispersiones como las utilizadas en el procesamiento de cerámicas), fundidos poliméricos (utilizados en el procesamiento de polímeros), pinturas y geles y productos alimenticios (yogur, mayonesa, catsup, etc.) exhiben un comportamiento parecido al de los plásticos de Bingham. Observe que los plásticos de Bingham presentan un comportamiento de adelgazamiento por corte (es decir, la viscosidad aparente disminuye con el incremento de la rapidez de deformación cortante).

Los materiales adelgazados por corte también exhiben un **comportamiento tixotrópico** (por ejemplo, pinturas, lechadas cerámicas, fundidos de polímero, geles, etc.). Los materiales tixotrópicos por lo general contienen algún tipo de red de partículas o moléculas. Cuando se aplica una deformación cortante lo suficientemente grande (es decir, mayor que la deformación crítica de fluencia), la red o estructura tixotrópica se rompe y el material empieza a fluir. A medida que el corte se detiene, la red comienza a formarse de nuevo y la resistencia al flujo aumenta. Los arreglos de partículas o moleculares en la red recién formada son distintos de aquellos de la red original. Por tanto, se dice que el comportamiento de los materiales tixotrópicos es dependiente del tiempo y del historial de deformación. Algunos materiales muestran un incremento en la viscosidad aparente como una función del tiempo y a una rapidez de deformación cortante constante. A estos materiales se les conoce como **reopécticos**.

Las propiedades reológicas de los materiales se determinan utilizando instrumentos conocidos como viscosímetro o *reómetro*. En estos instrumentos se aplica un esfuerzo o una rapidez de deformación constante al material que se está evaluando. Se utilizan distintos arreglos geométricos (por ejemplo, de cono y placa, de placa paralela, de Couette, etcétera).

En las siguientes secciones, se explicarán las diferentes propiedades mecánicas de los materiales sólidos y algunos de los métodos de prueba para evaluarlas.

6-3

Prueba de tensión: uso del diagrama esfuerzo-deformación unitaria

La prueba o ensayo de tensión es popular dado que las propiedades obtenidas pueden aplicarse al diseño de distintos componentes. Dicha prueba mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada de manera lenta. Las rapidez de deformación en una prueba de tensión por lo regular son pequeñas (10^{-4} a 10^{-2} s^{-1}). En la figura 6-5 se muestra una configuración de la prueba; un espécimen común tiene un diámetro de 0.505 pulg y una longitud calibrada de 2 cm. El espécimen se coloca en la máquina de pruebas y se aplica una fuerza F , llamada **carga**. Con frecuencia se utiliza una máquina universal de prueba en la que pueden

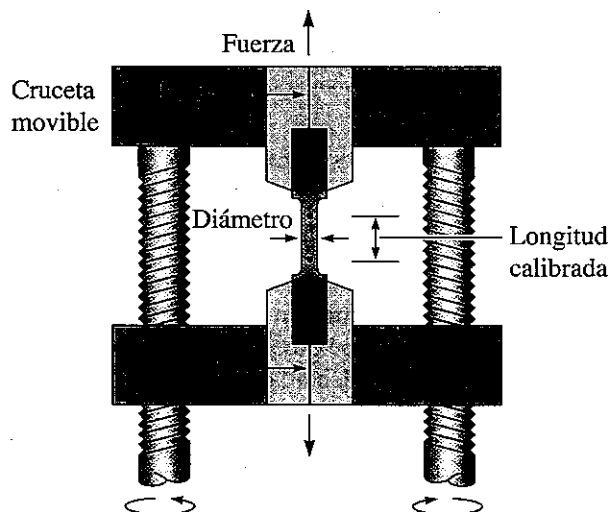


Figura 6-5

Se aplica una fuerza unidireccional a un espécimen en la prueba de tensión por medio de la cruzeta movable. El movimiento de la cruzeta puede llevarse a cabo utilizando tornillos o un mecanismo hidráulico.

llevarse a cabo pruebas de tensión y de compresión. Se utiliza un **deformímetro** o **extensómetro** para medir la cantidad que se estira el espécimen entre las marcas calibradas cuando se aplica la fuerza. Por tanto, se mide el cambio en longitud del espécimen (Δl) con respecto a la longitud original (l_0). La información que concierne a la resistencia, al módulo de Young, y a la ductilidad de un material puede obtenerse a partir de tal prueba de tensión. Por lo regular, se conduce una prueba de tensión sobre metales, aleaciones y plásticos. Las pruebas de tensión pueden utilizarse para las cerámicas, sin embargo, no son muy populares debido a que la muestra puede fracturarse cuando se está alineando. La siguiente explicación se aplica principalmente a la prueba de tensión de metales y aleaciones. También se explicará de manera breve el comportamiento esfuerzo-deformación de los polímeros.

La figura 6-6 muestra *de manera cualitativa* las curvas de esfuerzo-deformación unitaria para un a) metal, b) un material termoplástico, c) un elastómero y d) una cerámica (o vidrio) comunes, todos bajo rapidez de deformación relativamente pequeñas. Las escalas en esta figura son cualitativas y distintas para cada material. En la práctica, la magnitud real de los esfuerzos y deformaciones será muy diferente. Se supone que la temperatura del material termoplástico está por encima de su **temperatura de transición vítrea** (T_v). Se supone que la temperatura del metal está a la temperatura ambiente. Los materiales metálicos y termoplásticos muestran una región elástica inicial seguida por una región plástica no lineal. También se incluye una curva separada para los elastómeros (por ejemplo, caucho y siliconas) dado que el comportamiento de estos materiales es distinto del de otros materiales poliméricos. Para los elastómeros, una gran porción de la deformación es elástica y no lineal. Por otro lado, las cerámicas y los vidrios a temperatura ambiente sólo muestran una región elástica lineal y casi ninguna deformación plástica a temperatura ambiente.

Cuando se conduce una prueba de tensión la información registrada incluye la carga o fuerza como una función del cambio en longitud (Δl) como se muestra en la tabla 6-1 para una barra de prueba de aleación de aluminio. Esta información se convierte de manera subsecuente a esfuerzo y deformación. Posteriormente se analiza la curva esfuerzo-deformación unitaria para inferir las propiedades de los materiales (por ejemplo, el módulo de Young, la resistencia a la fluencia, etcétera).

Esfuerzo y deformación ingenieriles Los resultados de una sola prueba se aplican a todos los tamaños y secciones transversales de los especímenes para un

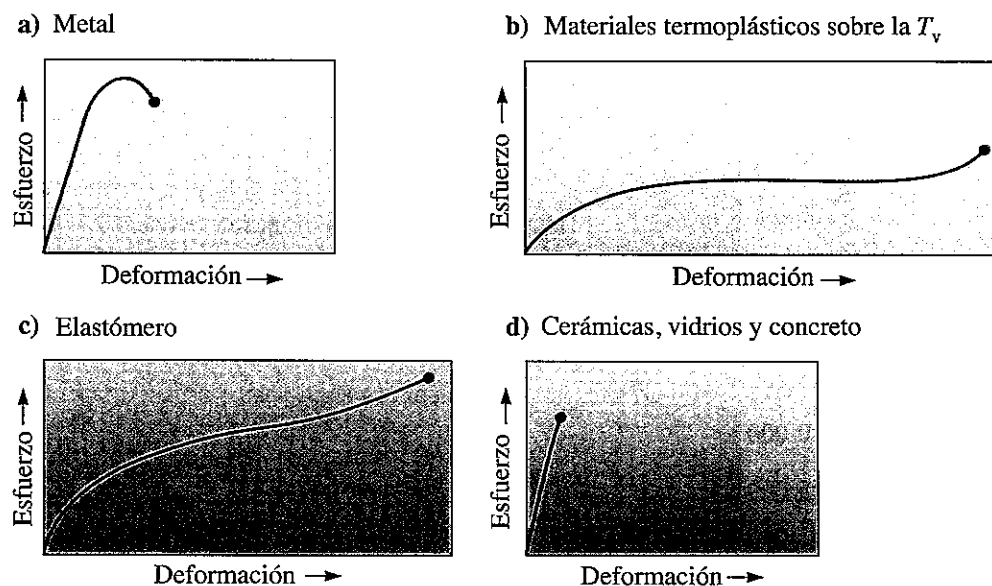


Figura 6-6 Curvas de esfuerzo-deformación a la tensión para distintos materiales. Observe que estas gráficas son *cualitativas*. Las magnitudes de los esfuerzos y las deformaciones no deben compararse.

TABLA 6-1 ■ Resultados de una prueba de tensión de una barra de prueba de aleación de aluminio de 0.505 pulg de diámetro, longitud inicial (l_0) = 2 pulg

Carga (lb)	Cambio en longitud (pulg)	Calculado	
		Esfuerzo (psi)	Deformación (pulg/pulg)
0	0.000	0	0
1 000	0.001	4 993	0.0005
3 000	0.003	14 978	0.0015
5 000	0.005	24 963	0.0025
7 000	0.007	34 948	0.0035
7 500	0.030	37 445	0.0150
7 900	0.080	39 442	0.0400
8 000 (carga máxima)	0.120	39 941	0.0600
7 950	0.160	39 691	0.0800
7 600 (fractura)	0.205	37 944	0.1025

material dado si se convierte la fuerza a esfuerzo y la distancia entre las marcas calibradas a deformación. El **esfuerzo ingenieril** y la **deformación ingenieril** se definen por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Esfuerzo ingenieril} = S = \frac{F}{A_0} \quad (6-6)$$

$$\text{Deformación ingenieril} = e = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (6-7)$$

donde A_0 es el área de la sección transversal *original* del espécimen antes de que comience la prueba, l_0 es la distancia *original* entre las marcas calibradas y Δl es el cambio en longitud después de que se aplica la fuerza F . En la tabla 6-1 se incluyen las conversiones de la carga y la longitud de la muestra al esfuerzo y la deformación. Se utiliza la curva esfuerzo-deformación (figura 6-7) para registrar los resultados de una prueba de tensión.

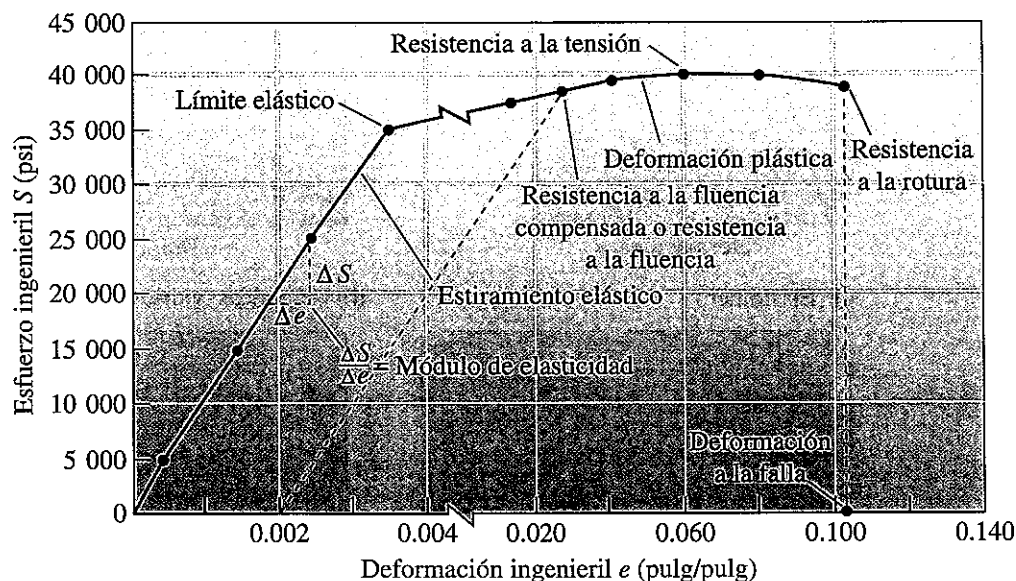


Figura 6-7 Curva esfuerzo-deformación ingenieriles para una aleación de aluminio a partir de la tabla 6-1.

Ejemplo 6-1**Prueba de tensión de un alambre de aluminio**

Convierta los datos del cambio en longitud en la tabla 6-1 a esfuerzo y deformación ingenieriles y grafique una curva de esfuerzo-deformación.

SOLUCIÓN

Para la carga de 1000 lb:

$$S = \frac{F}{A_0} = \frac{1000 \text{ lb}}{(\pi/4)(0.505 \text{ pulg})^2} = 4\,993 \text{ psi}$$

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{0.001 \text{ pulg}}{2.000 \text{ pulg}} = 0.0005 \text{ pulg/pulg}$$

En la tabla 6-1 se dan los resultados de cálculos similares para cada una de las cargas restantes y se grafican en la figura 6-7.

Unidades

Se utilizan varias unidades distintas para reportar los resultados de la prueba de tensión. Las unidades más comunes para el esfuerzo son libras por pulgada cuadrada (psi) y megapascals (MPa). Las unidades para la deformación incluyen pulgada/pulgada, centímetro/centímetro y metro/metro y, por tanto, la deformación con frecuencia se escribe como sin unidades. En la tabla 6-2 se resumen los factores de conversión para el esfuerzo. Debido a que la deformación es adimensional, no se requieren factores de conversión para cambiar el sistema de unidades.

TABLA 6-2 ■ Unidades y factores de conversión

1 libra (lb) = 4.448 newtons (N)
1 psi = libra por pulgada cuadrada
1 MPa = megapascal = meganewtons por metro cuadrado (MN/m ²)
= newtons por milímetro cuadrado (N/mm ²) = 10 ⁶ Pa
1 GPa = 1000 MPa = gigapascal
1 ksi = 1000 psi = 6.895 MPa
1 psi = 0.006895 MPa
1 MPa = 0.145 ksi = 145 psi

Ejemplo 6-2**Diseño de fuerza de una barra de aluminio**

Una barra de aluminio debe soportar una fuerza aplicada de 45 000 libras. En la figura 6-7 se muestra la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles para la aleación de aluminio a utilizarse. A fin de que la seguridad sea infalible, el esfuerzo máximo permisible sobre la barra se limita a 25 000 psi, el cual está por debajo de la resistencia a la fluencia del aluminio. La barra debe ser de al menos 150 pulg de largo pero no debe deformarse de manera elástica más de 0.25 pulg cuando se aplique la fuerza. Diseñe una barra apropiada.

SOLUCIÓN

A partir de la definición de la deformación ingenieril,

$$e = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Para una barra que es de 150 pulg de largo, la deformación que corresponde a una extensión de 0.25 pulg es

$$e = \frac{0.25 \text{ pulg}}{150 \text{ pulg}} = 0.00167$$

De acuerdo con la figura 6-7, esta deformación es puramente elástica y el valor del esfuerzo correspondiente es de aproximadamente 17 000 psi, el cual está debajo del límite de 25 000 psi. Se utiliza la definición de esfuerzo ingenieril para calcular el área de la sección transversal requerida de la barra:

$$S = \frac{F}{A_0}$$

Observe que el esfuerzo no debe exceder 17 000 psi, o en consecuencia, la deflexión será mayor a 0.25 pulg. Reordenando,

$$A_0 = \frac{F}{S} = \frac{45\,000 \text{ lb}}{17\,000 \text{ psi}} = 2.65 \text{ pulg}^2$$

La barra puede producirse en varias formas, siempre que el área de la sección transversal sea de 2.65 pulg². Para una sección transversal redonda, el diámetro mínimo para asegurar que el esfuerzo no sea muy alto es

$$A_0 = \frac{\pi d^2}{4} = 2.65 \text{ pulg}^2 \quad \text{o} \quad d = 1.84 \text{ pulg}$$

Por tanto, un diseño posible que cumple todos los criterios especificados es una barra de suspensión que sea de 150 pulg de largo con un diámetro de 1.84 pulg.

6-4

Propiedades obtenidas a partir de la prueba de tensión

Resistencia a la fluencia Cuando se le aplica un esfuerzo a un material, el material exhibe inicialmente una deformación elástica. La deformación que desarrolla se recupera por completo cuando se elimina el esfuerzo aplicado. A medida que se continúa incrementando dicho esfuerzo, el material con el tiempo “fluye” al esfuerzo aplicado y exhibe deformación elástica y plástica. El valor del esfuerzo crítico necesario para iniciar la deformación plástica se define como el **límite elástico** del material. En los materiales metálicos, por lo regular es el esfuerzo requerido para que se inicie el movimiento de las dislocaciones, o deslizamiento. En los materiales poliméricos, este esfuerzo corresponderá al desenredado de las cadenas de las moléculas de polímero o al deslizamiento de las cadenas entre sí. El **límite proporcional** se define como el nivel de esfuerzo sobre el cual la relación entre el esfuerzo y la deformación es no lineal.

En la mayoría de los materiales, el límite elástico y el límite proporcional están bastante cercanos; sin embargo, ni los valores del límite elástico ni del límite proporcional pueden determinarse con precisión. Los valores medidos dependen de la sensibilidad del equipo utilizado. Por tanto, se definen a un **valor de deformación compensado** (por lo regular, pero no siempre, de 0.002 o 0.2%). Después se traza una línea que comienza con el valor de deformación compensado y se traza una línea paralela a la porción lineal de la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles. El valor del esfuerzo que corresponde a la intersección de esta línea y la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles se define como la **resistencia a la fluencia compensada**, también enunciada con frecuencia como la **resistencia a la fluencia**. La resistencia a la fluencia compensada al 0.2% para el hierro colado gris es de 40 000 psi como se muestra en la figura 6-8a). Los ingenieros por lo regular prefieren utilizar la resistencia a la fluencia compensada para propósitos de diseño debido a que puede determinarse de manera fiable.

Para algunos materiales la transición de la deformación elástica al flujo plástico es bastante abrupta. A esta transición se le conoce como el **fenómeno del punto de fluencia**. En

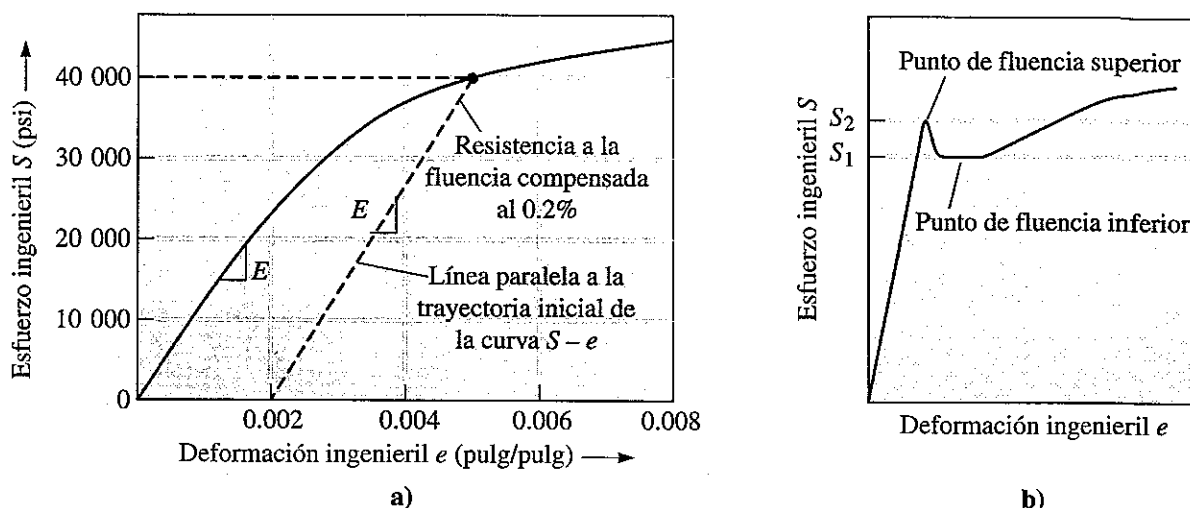


Figura 6-8 a) Determinación de la resistencia a la fluencia compensada al 0.2% en el hierro fundido gris y b) el comportamiento del punto de fluencia superior e inferior en un acero al bajo carbono.

estos materiales, a medida que comienza la deformación plástica, el valor del esfuerzo cae primero del *punto de fluencia superior* (S_2) [figura 6-8b)]. El valor del esfuerzo después oscila alrededor de un valor promedio definido como el *punto de fluencia inferior* (S_1). Para estos materiales, la resistencia a la fluencia se define por lo regular a partir de la deformación compensada al 0.2%.

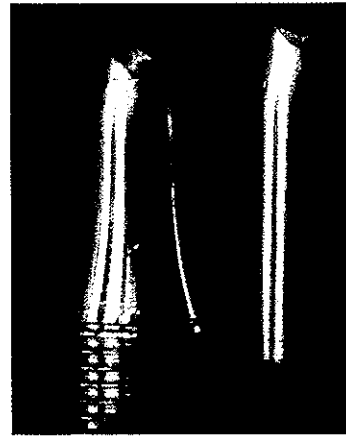
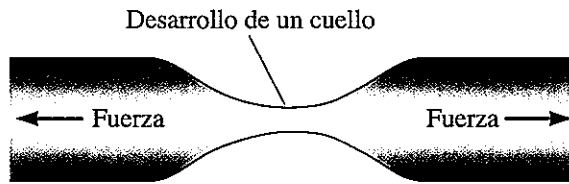
La curva de esfuerzo-deformación para ciertos aceros al bajo carbono muestra el fenómeno de punto de fluencia [figura 6-8b)]. Se espera que el material se deforme de manera plástica al esfuerzo S_1 ; sin embargo, los átomos intersticiales pequeños aglomerados alrededor de las dislocaciones interfieren con el deslizamiento y elevan el punto de fluencia a S_2 . Sólo después de que se aplica el esfuerzo más alto S_2 las dislocaciones se deslizan. Después de que comienza el deslizamiento a S_2 , las dislocaciones se alejan de las aglomeraciones de átomos pequeños y continúan moviéndose muy rápido al esfuerzo más bajo S_2 .

Cuando se diseñan partes para aplicaciones de soporte de carga, se prefiere que haya poca o ninguna deformación plástica. Como resultado se debe seleccionar un material tal que el esfuerzo del diseño sea considerablemente menor que la resistencia a la fluencia a la temperatura a la que se utilizará el material. También se puede hacer la sección transversal del componente más grande para que la fuerza aplicada produzca un esfuerzo que estará muy por debajo de la resistencia a la fluencia. Por otro lado, cuando se desea moldear materiales en componentes (por ejemplo, tomar una hoja de acero y formar el chasis de un automóvil), se necesita aplicar esfuerzos que estarán muy por encima de la resistencia a la fluencia.

Resistencia a la tensión

El esfuerzo obtenido en la fuerza aplicada más alta es la **resistencia a la tensión** (S_{UT}), la cual es el esfuerzo máximo en la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles. Este valor es también conocido de manera común como la **resistencia máxima a la tracción**. En muchos materiales dúctiles, la deformación no permanece uniforme. En algún punto, una región se deforma más que las otras y ocurre un gran decrecimiento *local* en el área de la sección transversal (figura 6-9). A esta región deformada de manera local se le llama "cuello". A este fenómeno se le conoce como **rebajo** (estricción). Debido a que el área de la sección transversal se vuelve más pequeña en este punto, se requiere una fuerza menor para continuar su deformación y el esfuerzo ingenieril, calculado a partir del área *original* A_0 , disminuye. La resistencia a la tensión es el esfuerzo a la que comienza el rebajo en los metales dúctiles. En la prueba de compresión los materiales se abultarán; por tanto el rebajo sólo se observa en una prueba de tensión.

La figura 6-10 muestra los valores de la resistencia a la fluencia comunes para varios materiales de ingeniería. Los metales ultrapuros tienen una resistencia a la fluencia de ~ 1 -10 MPa.



© Palm Bay High School

Figura 6-9 La deformación localizada de un material dúctil durante una prueba de tensión produce una región de rebajo. La micrografía muestra una región de rebajo en una muestra fracturada. (Este artículo fue publicado en *Materials Principles and Practice*, Charles Newey y Graham Weaver (Eds.), Fig. 6-9, p. 300. Copyright Open University.)

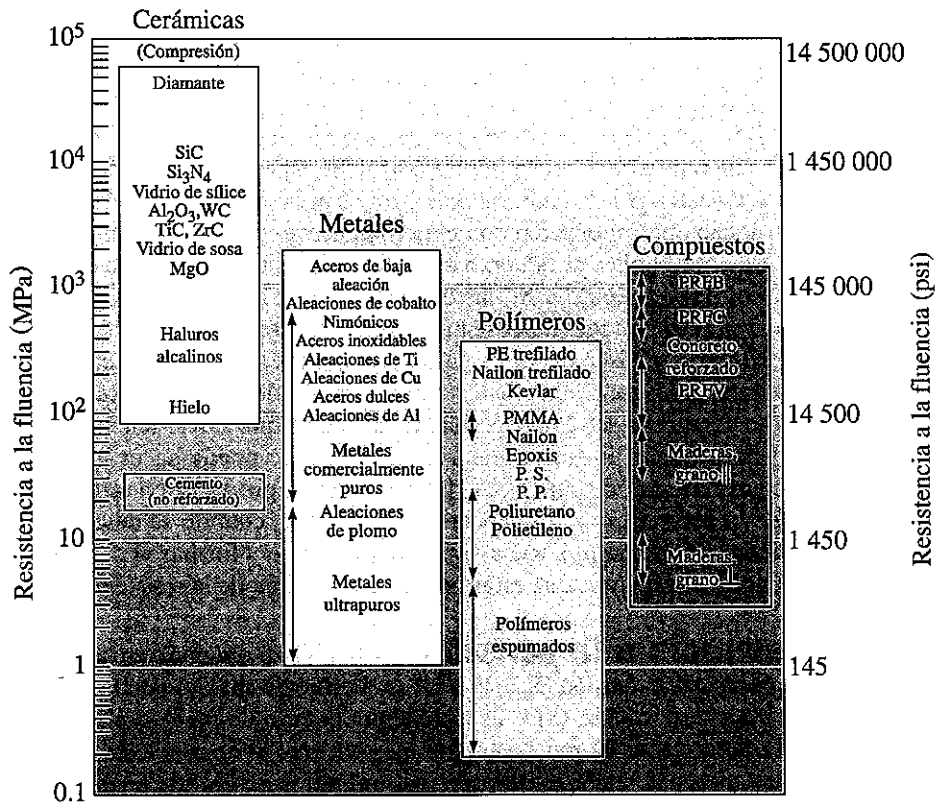


Figura 6-10 Valores de la resistencia a la fluencia comunes para distintos materiales de ingeniería. Observe que los valores mostrados están en MPa y psi. (Reimpresión de *Engineering Materials I*, segunda edición, M. F. Ashby y D. R. H. Jones, 1996, Fig. 8-12, p. 85. Copyright © 1996 Butterworth-Heinemann. Reimpresión con permiso de Elsevier Science.)

Por otro lado, la resistencia a la fluencia de las aleaciones es mayor. El endurecimiento en las aleaciones se logra utilizando distintos mecanismos descritos con anterioridad (por ejemplo, el tamaño del grano, la formación de soluciones sólidas, el endurecimiento por deformación, etc.). La resistencia a la fluencia de un metal o una aleación en particular por lo general es la misma para la tensión y la compresión. La resistencia a la fluencia de los plásticos y elastómeros por lo general es menor que la de los metales y las aleaciones, de hasta alrededor de 10-100 MPa. Los valores para las cerámicas (figura 6-10) son para la resistencia de compresión (obtenida utilizando una prueba de dureza). La resistencia a la tensión de la mayoría de las cerámicas es mucho menor (~ 100 -200 MPa). La resistencia a la tensión de los vidrios es de alrededor de ~ 70 MPa y depende de las fisuras en la superficie.

Propiedades elásticas El módulo de elasticidad, o *módulo de Young* (E), es la pendiente de la curva de esfuerzo-deformación unitaria en la región elástica. A esta relación entre el esfuerzo y la deformación en la región elástica se le conoce como **ley de Hooke**:

$$E = \frac{S}{e} \quad (6-8)$$

El módulo está estrechamente relacionado con las energías de unión de los átomos (figura 2-18). Una pendiente pronunciada en la gráfica fuerza-distancia en el espaciado de equilibrio (figura 2-19) indica que se requieren fuerzas altas para separar los átomos y ocasionar que el material se estire de manera elástica. Por tanto, el material tiene un módulo de elasticidad alto. Las fuerzas de unión, y por tanto el módulo de elasticidad, por lo regular son mayores para los materiales con puntos de fusión altos (tabla 6-3). En los materiales metálicos el módulo de elasticidad se considera una propiedad *insensible* a la microestructura dado que el valor está dominado por la rigidez de los enlaces atómicos. El tamaño de los granos u otras características microestructurales no tienen un gran efecto sobre el módulo de Young. Observe que el módulo de Young depende de tales factores como la orientación de un material monocristalino (es decir, depende de la dirección cristalográfica). Para las cerámicas el módulo de Young depende del nivel de porosidad. El módulo de Young de un compuesto depende de la rigidez y de las cantidades de los componentes individuales.

La **rigidez** de un componente es proporcional a su módulo de Young. (La rigidez también depende de las dimensiones de los componentes.) Un componente con un módulo de elasticidad alto mostrará cambios mucho menores en las dimensiones si el esfuerzo aplicado sólo ocasiona una deformación elástica cuando se compara con un componente con un módulo de elasticidad menor. La figura 6-11 compara el comportamiento elástico del acero y el aluminio. Si se aplica un esfuerzo de 30 000 psi a cada material, el acero se deforma de manera elástica 0.001 pulg/pulg; al mismo esfuerzo, el aluminio se deforma 0.003 pulg/pulg. El módulo elástico del acero es casi tres veces mayor que el del aluminio.

La figura 6-12 muestra los intervalos de los módulos elásticos para varios materiales de ingeniería. El módulo de elasticidad de los plásticos es mucho menor que el de los metales o cerámicas y vidrios. Por ejemplo, el módulo de elasticidad del nailon es de 2.7 GPa ($\sim 0.4 \times 10^6$ psi); el módulo de las fibras de vidrio es de 72 GPa ($\sim 10.5 \times 10^6$ psi). El módulo de Young

TABLA 6-3 ■ Propiedades elásticas y temperatura de fusión (T_f) de materiales seleccionados

Material	T_f (°C)	E (psi)	Razón de Poisson (ν)
Pb	327	2.0×10^6	0.45
Mg	650	6.5×10^6	0.29
Al	660	10.0×10^6	0.33
Cu	1085	18.1×10^6	0.36
Fe	1538	30.0×10^6	0.27
W	3410	59.2×10^6	0.28
Al ₂ O ₃	2020	55.0×10^6	0.26
Si ₃ N ₄		44.0×10^6	0.24

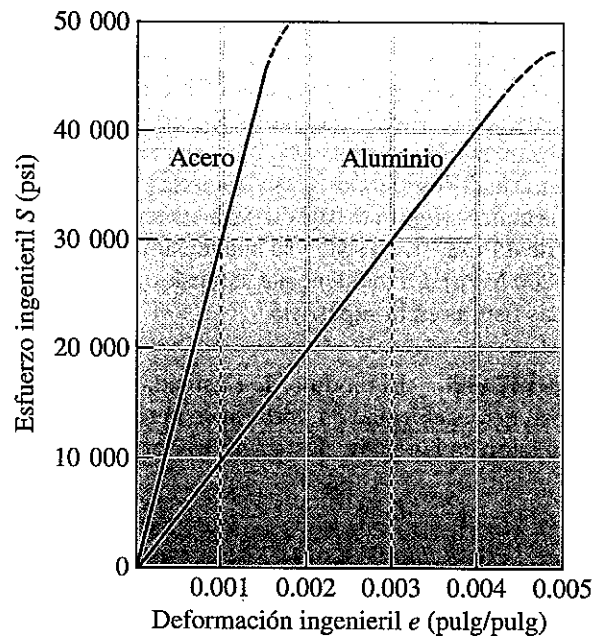


Figura 6-11

Comparación del comportamiento elástico del acero y el aluminio. Para un esfuerzo dado el aluminio se deforma de manera elástica tres veces más que el acero (es decir, el módulo elástico del aluminio es casi tres veces menor que el del acero).

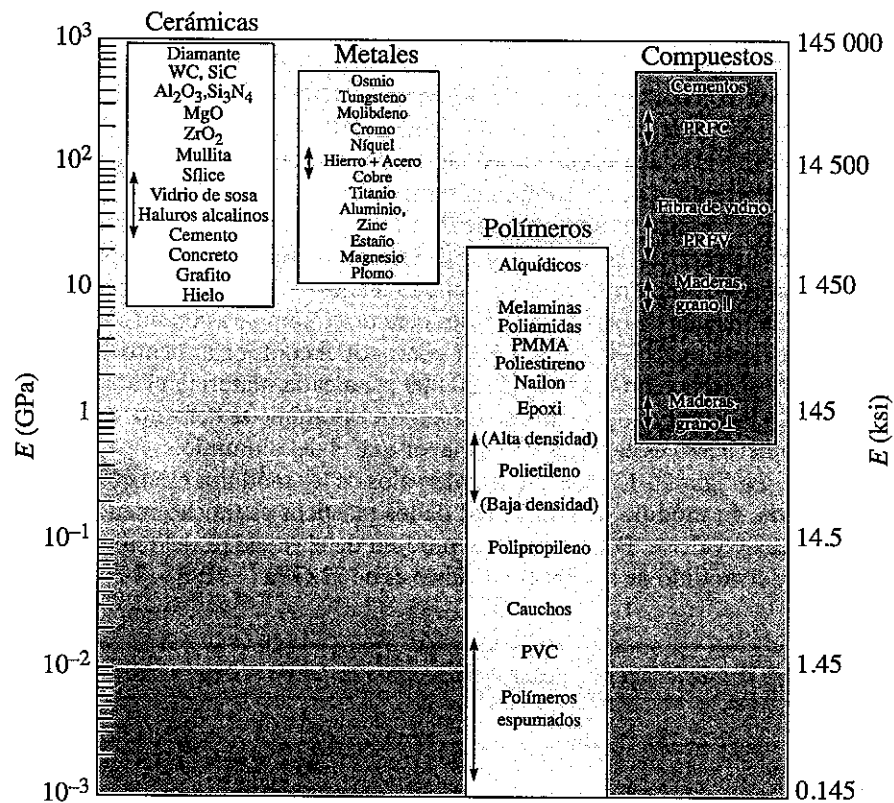


Figura 6-12 Intervalo de los módulos elásticos para distintos materiales de ingeniería.

Nota: los valores se muestran en GPa y ksi. (Reimpresión de Engineering Materials I, segunda edición, M. F. Ashby y D. R. H. Jones, 1996, Fig. 3-5, p. 35. Copyright © 1996 Butterworth-Heinemann. Reimpresión con permiso de Elsevier Science.)

de los compuestos como los compuestos reforzados con fibras de vidrio (CRFV) o los compuestos reforzados con fibra de carbono (CRFC) se encuentra entre los valores para el polímero de la matriz y la fase de fibra (fibras de carbono o vidrio) y depende de sus fracciones volumétricas relativas. El módulo de Young de muchas aleaciones y cerámicas es más alto, por lo general de hasta 410 GPa (~60 000 ksi). Las cerámicas, debido a la resistencia de sus enlaces iónicos y covalentes, tienen los módulos elásticos más altos.

La **razón de Poisson**, ν , relaciona la deformación elástica longitudinal producida por un esfuerzo de tensión sencillo o un esfuerzo de compresión con la deformación lateral que ocurre de manera simultánea:

$$\nu = \frac{-e_{\text{lateral}}}{e_{\text{longitudinal}}} \quad (6-9)$$

Para muchos metales en la región elástica, la razón de Poisson es por lo regular de alrededor de 0.3 (tabla 6-3). Durante una prueba de tensión, la razón aumenta más allá de la fluencia a alrededor de 0.5, dado que durante la deformación plástica, el volumen permanece constante. Algunas estructuras interesantes, como algunas estructuras de panal y de las espumas, exhiben razones de Poisson negativas. *Nota: La razón de Poisson no debe confundirse con la viscosidad cinemática, ambas se indican por medio de la letra griega ν .*

El **módulo de resiliencia** (E_r), el área contenida bajo la porción elástica de una curva de esfuerzo-deformación, es la energía elástica que absorbe un material durante la carga y que se libera de manera subsecuente cuando se elimina la carga. Para el comportamiento elástico lineal:

$$E_r = \left(\frac{1}{2} \right) (\text{resistencia a la fluencia})(\text{deformación en la fluencia}) \quad (6-10)$$

La habilidad de un resorte o de una pelota de golf para desempeñarse de manera satisfactoria depende de un módulo de resiliencia alto.

Tenacidad a la tensión A la energía absorbida por un material antes de fracturarse se le conoce como **tenacidad a la tensión** y en algunas ocasiones se mide como el área bajo la curva de esfuerzo-deformación verdaderos (también llamada **trabajo de fractura**). En la sección 6-5 se definirán el esfuerzo y la deformación verdaderos. Dado que es más sencillo medir el esfuerzo-deformación ingenieril, los ingenieros con frecuencia igualan la tenacidad a la tensión con el área bajo la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles.

Ejemplo 6-3

Calcule el módulo de elasticidad de la aleación de aluminio para la que se muestra la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles en la figura 6-7. Calcule la longitud de una barra de longitud inicial de 50 pulg, cuando se aplica un esfuerzo de tensión de 30 000 psi.

SOLUCIÓN

Cuando se aplica un esfuerzo de 34 948 psi, se produce una deformación de 0.0035 pulg/pulg. Por tanto

$$\text{Módulo de elasticidad} = E = \frac{S}{e} = \frac{34\,948 \text{ psi}}{0.0035} = 10 \times 10^6 \text{ psi}$$

Observe que cualquier combinación de esfuerzo y deformación en la región elástica producirá este resultado. A partir de la ley de Hooke:

$$e = \frac{S}{E} = \frac{30\,000 \text{ psi}}{10 \times 10^6 \text{ psi}} = 0.003 \text{ pulg/pulg}$$

A partir de la definición de la deformación ingenieril

$$e = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Por tanto,

$$\Delta l = e(l_0) = 0.003 \text{ pulg/pulg}(50 \text{ pulg}) = 0.15 \text{ pulg}$$

Cuando la barra se sujeta a un esfuerzo de 30 000 psi, la longitud total está dada por

$$l = \Delta l + l_0 = 0.15 \text{ pulg} + 50 \text{ pulg} = 50.15 \text{ pulg}$$

Ductilidad La **ductilidad** es la habilidad de un material a deformarse de manera permanente sin romperse cuando se aplica una fuerza. Existen dos medidas comunes de la ductilidad. El **porcentaje de elongación** cuantifica la deformación plástica permanente en la falla (es decir, no se incluye la deformación elástica recuperada después de la fractura) midiendo la distancia entre las marcas calibradas en el espécimen antes y después de la prueba. Observe que la deformación después de la falla es menor que la deformación en el punto de ruptura, debido a que el esfuerzo elástico se recupera cuando la carga se elimina. El porcentaje de elongación puede escribirse como

$$\% \text{ de elongación} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 \quad (6-11)$$

donde l_f es la distancia entre las marcas calibradas después de que el espécimen se rompe.

Un segundo método es medir el cambio porcentual en el área de la sección transversal en el punto de fractura antes y después de la prueba. La **reducción porcentual en el área** describe la cantidad de adelgazamiento experimentado por el espécimen durante la prueba:

$$\% \text{ de reducción en el área} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 \quad (6-12)$$

donde A_f es el área de la sección transversal final en la superficie de la fractura.

La ductilidad es importante para los diseñadores de componentes de soporte de carga y para los fabricantes de componentes (barras, varillas, alambres, placas, vigas en I, fibras, etc.) que utilizan algún procesamiento de materiales.

Ejemplo 6-4

Ductilidad por elongación y reducción de área

La aleación de aluminio en el ejemplo 6-1 tiene una longitud final después de la falla de 2.195 pulg y un diámetro final de 0.398 pulg en la superficie fracturada. Calcule la ductilidad de esta aleación.

SOLUCIÓN

$$\% \text{ de elongación} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 = \frac{2.195 - 2.000}{2.000} \times 100 = 9.75\%$$

$$\% \text{ de reducción en el área} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100$$

$$= \frac{(\pi/4)(0.505)^2 - (\pi/4)(0.398)^2}{(\pi/4)(0.505)^2} \times 100$$

$$= 37.9\%$$

La longitud final es menor a 2.205 pulg (vea la tabla 6-1) debido a que, después de la fractura, se recupera la deformación elástica.

Efecto de la temperatura Las propiedades mecánicas de los materiales dependen de la temperatura (figura 6-13). La resistencia a la fluencia, la resistencia a la tensión y el módulo de elasticidad disminuyen a temperaturas más altas, mientras que la ductilidad por lo general aumenta. Un fabricante de materiales puede desear deformar un material a una temperatura alta (conocido como *trabajo en caliente*) para aprovechar la ductilidad más alta y el esfuerzo menor requerido.

Se utiliza el término “temperatura alta” aquí con una nota de cautela. Una temperatura alta se define con relación a la temperatura de fusión. Por tanto, 500 °C es una temperatura alta para las aleaciones de aluminio; sin embargo, es una temperatura relativamente baja para el procesamiento de aceros. En los metales, la resistencia a la fluencia disminuye con rapidez a temperaturas más altas debido a una disminución de la densidad de las dislocaciones y a un incremento en el tamaño de los granos por medio del crecimiento de los granos (capítulo 5) o a un proceso relacionado, conocido como recristalización (como se describe posteriormente en el capítulo 8). De manera similar, cualquier endurecimiento que pudo haber ocurrido debido a la formación de precipitados ultrafinos también puede disminuir a medida que el precipitado comienza a crecer en tamaño o a disolverse en la matriz. En capítulos posteriores se explicarán a mayor detalle estos efectos. Cuando las temperaturas se reducen, muchos metales y aleaciones, pero no todos, se vuelven quebradizos.

El incremento de las temperaturas también desempeña una función importante en la formación de materiales poliméricos y vidrios inorgánicos. En varias operaciones de procesamiento de polímeros, como la extrusión o el proceso de estiramiento-soplado (capítulo 16), el incremento de la ductilidad de los polímeros a temperaturas más altas es ventajoso. De nuevo, se debe tener cuidado con relación al uso del término “temperatura alta”. Para los polímeros,

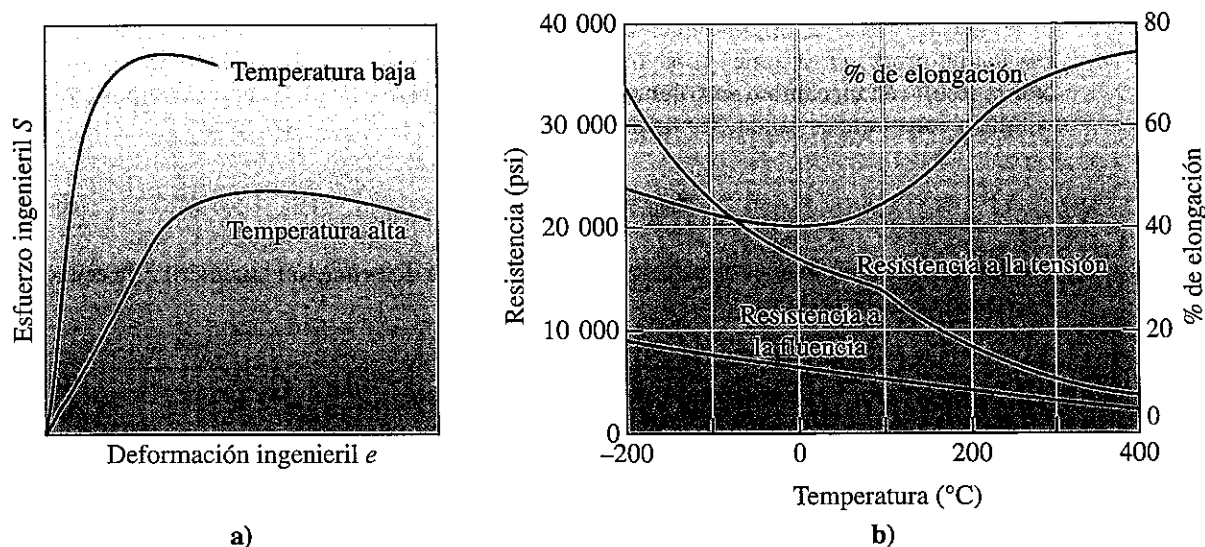


Figura 6-13 Efecto de la temperatura a) sobre la curva de esfuerzo-deformación y b) sobre las propiedades de tensión de una aleación de aluminio.

el término "temperatura alta" por lo general se refiere a una temperatura mayor que la temperatura de transición vítrea (T_v). Para este propósito, la temperatura de transición vítrea es una temperatura por debajo de la cual los materiales se comportan como materiales quebradizos. Sobre la temperatura de transición vítrea los plásticos se vuelven dúctiles. La temperatura de transición vítrea no es una temperatura fija, pero depende de la rapidez de enfriamiento al igual que de la distribución de los pesos moleculares de los polímeros. Muchos plásticos son dúctiles a temperatura ambiente debido a que sus temperaturas de transición vítrea están *por debajo* de la temperatura ambiente. Para resumir, muchos materiales poliméricos se volverán más duros y más quebradizos a medida que se exponen a temperaturas que estén por debajo de sus temperaturas de transición vítrea. Las razones para la pérdida de ductilidad a temperaturas más bajas en los polímeros y los materiales metálicos son distintas; sin embargo, éste es un factor que desempeñó una función en las fallas del *Titanic* en 1912 y del *Challenger* en 1986.

Los materiales cerámicos y vítreos por lo general se consideran quebradizos a temperatura ambiente. A medida que aumenta la temperatura, los vidrios pueden volverse más dúctiles. Como resultado, el procesamiento de vidrios (por ejemplo, el reforzamiento con fibras o la fabricación de botellas) se lleva a cabo a temperaturas altas.

6-5 Esfuerzo verdadero y deformación verdadera

La disminución en el esfuerzo ingenieril más allá de la resistencia a la tensión en una curva de esfuerzo-deformación ingenieriles está relacionada con la definición de esfuerzo ingenieril. Se utiliza el área original A_0 en estos cálculos, pero ésta no es precisa debido a que el área cambia de manera continua. El **esfuerzo verdadero** y la **deformación verdadera** se definen por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Esfuerzo verdadero} = \sigma = \frac{F}{A} \quad (6-13)$$

$$\text{Deformación verdadera} = \varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \left(\frac{l}{l_0} \right) \quad (6-14)$$

donde A es el área instantánea sobre la que se aplica la fuerza F , l es la longitud instantánea de la muestra y l_0 es la longitud inicial. En el caso de los metales, la deformación plástica es en esencia un proceso a volumen constante (es decir, la creación y la propagación de las dislocaciones resulta en un cambio en volumen despreciable en el material). Cuando la suposición del volumen constante es válida, se puede escribir

$$A_0 l_0 = A l \text{ o } A = \frac{A_0 l_0}{l} \quad (6-15)$$

y utilizando las definiciones de esfuerzo ingenieril S y de deformación ingenieril e , la ecuación 6-13 puede escribirse como

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \left(\frac{l}{l_0} \right) = S \left(\frac{l_0 + \Delta l}{l_0} \right) = S(1 + e) \quad (6-16)$$

También se puede demostrar que

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (6-17)$$

Por tanto, es una cuestión sencilla convertir entre los sistemas de esfuerzo-deformación ingenieriles y de esfuerzo-deformación verdaderos. Observe que las expresiones en las ecuaciones 6-16 y 6-17 no son válidas después de que comienza el rebajo, debido a que después de que éste

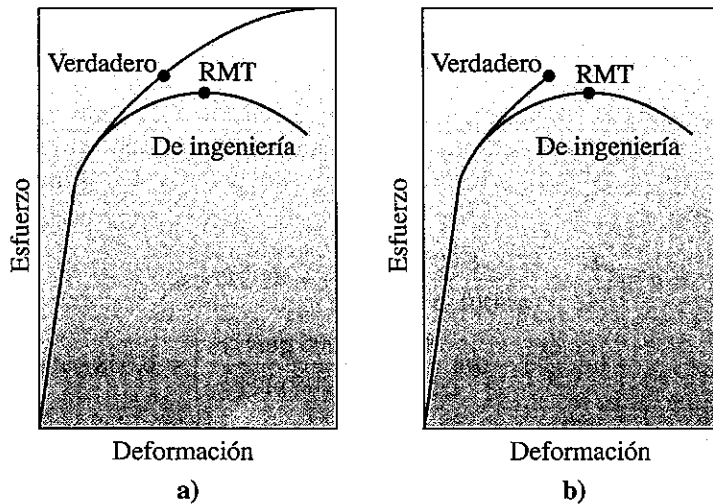


Figura 6-14 a) Relación entre el diagrama esfuerzo verdadero-deformación verdadera y el diagrama de esfuerzo-deformación ingenieriles. Las curvas son nominalmente idénticas al punto de fluencia. Se indica el esfuerzo verdadero que corresponde a la resistencia máxima a la tensión (RMT). b) Por lo regular las curvas de esfuerzo-deformación verdaderos debe truncarse en el esfuerzo verdadero que corresponde a la resistencia máxima a la tensión, dado que se desconoce el área de la sección transversal en el cuello.

inicia, la distribución de la deformación a lo largo de la longitud calibrada no es uniforme. Después de que comienza el rebajo, debe utilizarse la ecuación 6-13 para calcular el esfuerzo verdadero y debe utilizarse la expresión

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) \quad (6-18)$$

para calcular la deformación verdadera. La ecuación 6-8 surge de las ecuaciones 6-14 y 6-15. Después del rebajo el área instantánea A es el área de la sección transversal del cuello A_{cuello} .

En la figura 6-14a) se compara la curva de esfuerzo verdadero-deformación verdadera con la curva de esfuerzo-deformación ingenieril. No existe un máximo en la curva de esfuerzo verdadero-deformación verdadera.

Observe que es difícil medir el área instantánea de la sección transversal del cuello. Por tanto las curvas de esfuerzo verdadero-deformación verdadera por lo regular se truncan en el esfuerzo verdadero que corresponde a la resistencia máxima a la tensión, como se muestra en la figura 6-14b).

Ejemplo 6-5

Compare el esfuerzo y la deformación ingenieriles con el esfuerzo y la deformación verdaderos para la aleación de aluminio en el ejemplo 6-1 en a) la carga máxima y b) en la fractura. El diámetro en la carga máxima es de 0.4905 pulg y en la fractura es de 0.398 pulg.

SOLUCIÓN

a) En la carga máxima:

$$\text{Esfuerzo ingenieril } S = \frac{F}{A_0} = \frac{8000 \text{ lb}}{(\pi/4)(0.505 \text{ pulg})^2} = 39\,941 \text{ psi}$$

$$\text{Deformación ingenieril } e = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{2.120 - 2.000}{2.000} = 0.060 \text{ pulg/pulg}$$

$$\text{Esfuerzo verdadero} = \sigma = S(1 + e) = 39\,941(1 + 0.060) = 42\,337 \text{ psi}$$

$$\text{Deformación verdadera} = \ln(1 + e) = \ln(1 + 0.060) = 0.058 \text{ pulg/pulg}$$

La carga máxima es el último punto en el que aplica la expresión utilizada aquí para el esfuerzo verdadero y la deformación verdadera. Observe que se obtienen las mismas respuestas para el esfuerzo y la deformación verdaderos si se utilizan las dimensiones instantáneas.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{8\,000 \text{ lb}}{(\pi/4)(0.4905 \text{ pulg})^2} = 42\,337 \text{ psi}$$

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) = \ln\left[\frac{(\pi/4)(0.505 \text{ pulg}^2)}{(\pi/4)(0.4905 \text{ pulg}^2)}\right] = 0.058 \text{ pulg/pulg}$$

Hasta el punto de rebajo en una prueba de tensión, el esfuerzo ingenieril es menor que el esfuerzo verdadero correspondiente y la deformación ingenieril es mayor que la deformación verdadera correspondiente.

b) En la fractura:

$$S = \frac{F}{A_0} = \frac{7\,600 \text{ lb}}{(\pi/4)(0.505 \text{ pulg})^2} = 37\,944 \text{ psi}$$

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{2.205 - 2.000}{2.000} = 0.103 \text{ pulg/pulg}$$

$$\sigma = \frac{F}{A_f} = \frac{7\,600 \text{ lb}}{(\pi/4)(0.398 \text{ pulg})^2} = 61\,088 \text{ psi}$$

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) = \ln\left[\frac{(\pi/4)(0.505 \text{ pulg}^2)}{(\pi/4)(0.398 \text{ pulg}^2)}\right] = \ln(1.601) = 0.476 \text{ pulg/pulg}$$

Fue necesario utilizar las dimensiones instantáneas para calcular el esfuerzo y la deformación verdaderos, dado que la falla ocurre después del punto de rebajo. Después del rebajo, la deformación verdadera es mayor que la deformación ingenieril correspondiente.

6-6 **Prueba de flexión para materiales quebradizos**

En los materiales metálicos dúctiles la curva de esfuerzo-deformación ingenieril por lo regular pasa a través de un máximo; este esfuerzo máximo es la resistencia a la tensión del material. La falla ocurre a un esfuerzo ingenieril menor después de que el rebajo ha reducido el área de la sección transversal que soporta la carga. En los materiales más quebradizos, la falla ocurre en la carga máxima, donde la resistencia a la tensión y la resistencia a la ruptura son iguales (figura 6-15).

En muchos materiales quebradizos la prueba de tensión normal no puede llevarse a cabo con facilidad debido a la presencia de fisuras en la superficie. Con frecuencia, el sólo colocar un material quebradizo en las mordazas de la máquina para la prueba de tensión ocasiona que se agriete. Estos materiales quebradizos pueden probarse utilizando la **prueba de flexión** [figura 6-16a]. Al aplicar la carga en tres puntos y ocasionando una flexión, una fuerza de tensión actúa sobre el material opuesta al punto medio. La fractura comienza en esta localización. La **resistencia a la flexión**, o **módulo de ruptura**, describe la resistencia del material:

$$\text{Resistencia a la flexión para la prueba de flexión en tres puntos } \sigma_{\text{flexión}} = \frac{3FL}{2wh^2} \quad (6-19)$$

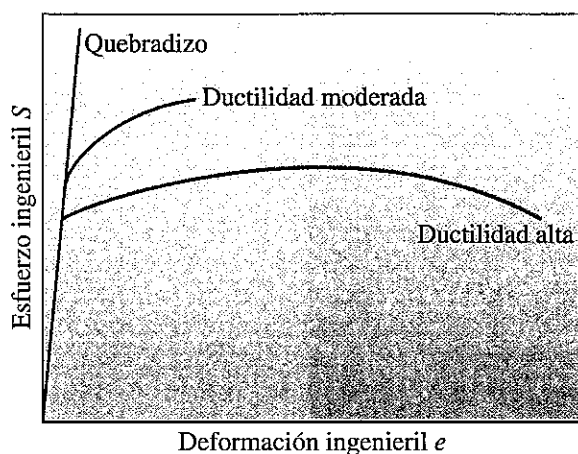


Figura 6-15
Comportamiento de esfuerzo-deformación ingenieril de los materiales quebradizos en comparación con el de los materiales más dúctiles.

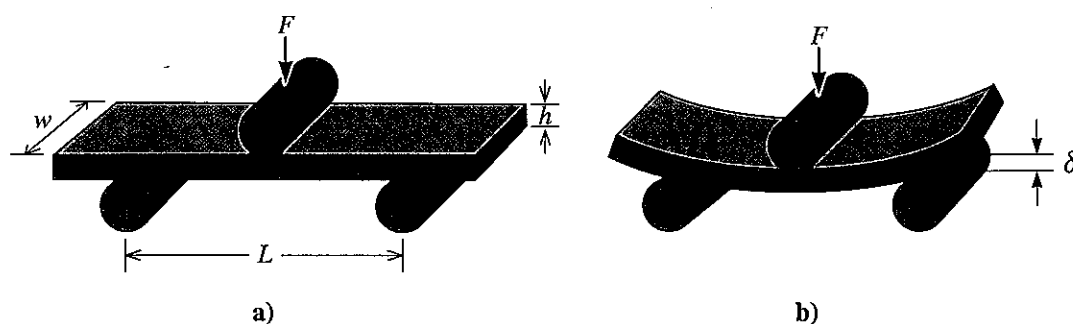


Figura 6-16 a) La prueba de flexión se utiliza con frecuencia para medir la resistencia de materiales quebradizos y b) la deflexión δ obtenida por medio de la flexión.

donde F es la carga de la fractura, L es la distancia entre los dos puntos externos, w es el ancho del espécimen y h es la altura del espécimen. La resistencia a la flexión tiene unidades del esfuerzo. Los resultados de la prueba de flexión son similares a los de las curvas de esfuerzo-deformación; sin embargo, el esfuerzo se grafica en función de la deflexión en vez de en función de la deformación (figura 6-17). En la figura 6-18a) se muestra el diagrama de momento de flexión correspondiente.

Los módulos de elasticidad en la flexión, o el **módulo de flexión** ($E_{\text{flexión}}$), se calculan como

$$\text{Módulo de flexión } E_{\text{flexión}} = \frac{L^3 F}{4wh^3 \delta} \quad (6-20)$$

donde δ es la deflexión de la viga cuando se aplica una fuerza F .

Esta prueba también puede realizarse utilizando una configuración conocida como prueba de flexión en cuatro puntos [figura 6-18b)]. El esfuerzo máximo o esfuerzo de flexión para una prueba de flexión en cuatro puntos está dada por

$$\sigma_{\text{flexión}} = \frac{3FL_1}{4wh^2} \quad (6-21)$$

para el caso específico en el que $L_1 = L/4$ en la figura 6-18b).

Observe que las deducciones de las ecuaciones 6-19 a 6-20 suponen una respuesta esfuerzo-deformación lineal (por tanto no puede aplicarse de manera correcta a muchos polí-

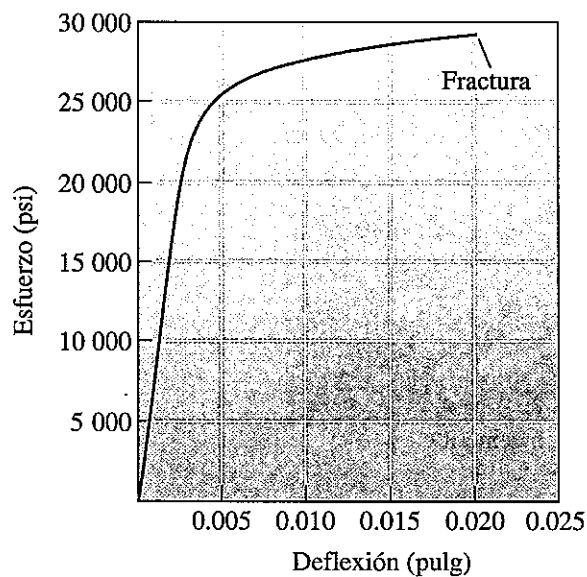


Figura 6-17
Curva de esfuerzo-deflexión para el MgO cerámico obtenida a partir de una prueba de flexión.

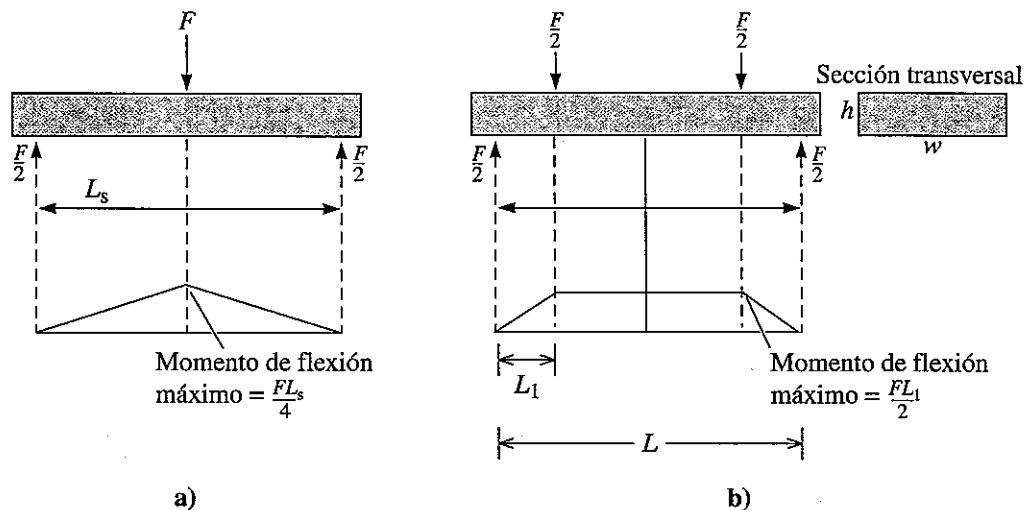


Figura 6-18 Configuración de la prueba de flexión en a) tres puntos y b) cuatro puntos.

meros). La prueba de flexión en cuatro puntos es más adecuada para probar materiales que contienen imperfecciones. Esto se debe a que el momento de flexión entre las patinas internas es constante [figura 6-18b)]; por tanto las muestras tienden a romperse de manera aleatoria a menos de que haya una imperfección que eleve de manera local el esfuerzo.

Dado que las grietas y las imperfecciones tienden a permanecer cerradas en compresión, los materiales quebradizos como el concreto con frecuencia se incorporan en los diseños de tal manera que sólo los esfuerzos de compresión actúen sobre la parte. Con frecuencia, se encuentra que los materiales quebradizos fallan a esfuerzos de compresión mucho más altos que los esfuerzos de tensión (tabla 6-4). Ésta es la respuesta a por qué es posible soportar el peso de un camión de bomberos sobre cuatro tazas para café; sin embargo, las cerámicas poseen una tenacidad mecánica muy limitada. Por tanto cuando se deja caer una taza de cerámica para café puede romperse con facilidad.

TABLA 6-4 ■ Comparación de las resistencias a la tensión, compresión y flexión de los materiales cerámicos y compuestos seleccionados

Material	Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia a la compresión (psi)	Resistencia a la flexión (psi)
Poliéster-50% fibras de vidrio	23 000	32 000	45 000
Poliéster-50% tejido de fibra de vidrio	37 000	27 000 ^a	46 000
Al ₂ O ₃ (99% puro)	30 000	375 000	50 000
SiC (sinterizado sin presión)	25 000	560 000	80 000

^aVarios materiales compuestos son bastante deficientes en compresión.

Ejemplo 6-6

Resistencia a la flexión de los materiales compuestos

La resistencia a la flexión de un material compuesto reforzado con fibras de vidrio es de 45 000 psi y el módulo de flexión es de 18×10^6 psi. Se soporta una muestra, la cual es de 0.5 pulg de ancho, 0.375 pulg de alto y 8 pulg de largo, entre dos barras separadas 5 pulg. Determine la fuerza requerida para fracturar el material y la deflexión de la muestra en la fractura, suponiendo que no ocurre ninguna deformación plástica.

SOLUCIÓN

Con base en la descripción de la muestra, $w = 0.5$ pulg, $h = 0.375$ pulg y $L = 5$ pulg. A partir de la ecuación 6-19:

$$45\,000 \text{ psi} = \frac{3FL}{2wh^2} = \frac{(3)(F)(5 \text{ pulg})}{(2)(0.5 \text{ pulg})(0.375 \text{ pulg})^2} = 106.7F$$

$$F = \frac{45\,000}{106.7} = 422 \text{ lb}$$

Por tanto, la deflexión, a partir de la ecuación 6-20, es:

$$18 \times 10^6 \text{ psi} = \frac{L^3 F}{4wh^3 \delta} = \frac{(5 \text{ pulg})^3 (422 \text{ lb})}{(4)(0.5 \text{ pulg})(0.375 \text{ pulg})^3 \delta}$$

$$\delta = 0.0278 \text{ pulg}$$

En este cálculo se supuso una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación y también que no hay comportamiento viscoelástico.

6-7 Dureza de los materiales

La **prueba de dureza** mide la resistencia a la penetración de la superficie de un material por un objeto duro. La dureza como término no puede definirse de manera precisa. La dureza, dependiendo del contexto, representa la resistencia a los rayones o a la indentación y una medida cualitativa de la resistencia del material. En general, en las mediciones de la **macro dureza**, la carga aplicada es de ~ 2 N. Se ha diseñado una variedad de pruebas de dureza, pero las más

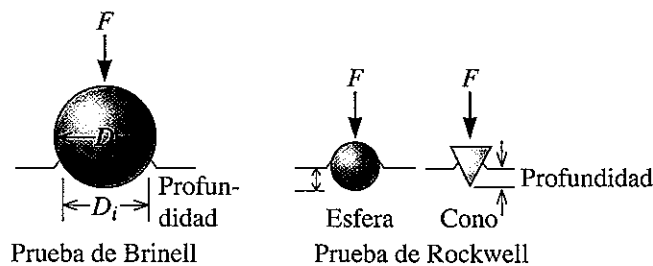


Figura 6-19
Penetradores para las pruebas de dureza de Brinell y de Rockwell.

comúnmente utilizadas son la prueba de Rockwell y la prueba de Brinell. En la figura 6-19 se muestran los distintos penetradores empleados en estas pruebas.

En la *prueba de dureza de Brinell*, una esfera de acero duro (por lo regular de 10 mm de diámetro) es forzada contra la superficie del material. Se mide el diámetro de la impresión, por lo regular de 2 a 6 mm, y se calcula el número de dureza de Brinell (abreviado como DB o NDB) a partir de la siguiente ecuación:

$$DB = \frac{2F}{\pi D \left[D - \sqrt{D^2 - D_i^2} \right]} \quad (6-22)$$

donde F es la carga aplicada en kilogramos, D es el diámetro del penetrador en milímetros y D_i es el diámetro de la impresión en milímetros. La dureza de Brinell tiene las unidades de kg/mm^2 .

La *prueba de dureza de Rockwell* utiliza una esfera de acero de diámetro pequeño para materiales blandos y un cono de diamante, o Brale, para materiales más duros. La profundidad de la penetración del penetrador es medida de manera automática por la máquina para la prueba y se convierte a un número de dureza de Rockwell (DR). Dado que no se necesita una medición óptica de las dimensiones de la indentación, la prueba de Rockwell tiende a ser más popular que la prueba de Brinell. Se utilizan diversas variaciones de la prueba de Rockwell, incluyendo las descritas en la tabla 6-5. Se utiliza una prueba de Rockwell C (DRC) para aceros duros, mientras que podría seleccionarse una prueba de Rockwell F (DRF) para el aluminio. Las pruebas de Rockwell proveen un número de dureza que no posee unidades.

Los números de dureza se utilizan principalmente como una base *cualitativa* para la comparación de materiales, especificaciones para la fabricación y el tratamiento térmico,

TABLA 6-5 ■ Comparación de las pruebas de dureza comunes

Prueba	Penetrador	Carga	Aplicación
De Brinell	Esfera de 10 mm	3000 kg	Hierro colado y acero
De Brinell	Esfera de 10 mm	500 kg	Aleaciones no ferrosas
De Rockwell A	Cono	60 kg	Materiales muy duros
De Rockwell B	Esfera de 1/16 pulg	100 kg	Latón, acero de baja resistencia
De Rockwell C	Cono	150 kg	Acero de alta resistencia
De Rockwell D	Cono	100 kg	Acero de alta resistencia
De Rockwell E	Esfera de 1/8 pulg	100 kg	Materiales muy blandos
De Rockwell F	Esfera de 1/16 pulg	60 kg	Aluminio, materiales blandos
De Vickers	Pirámide cuadrada de diamante	10 kg	Todos los materiales
De Knoop	Pirámide alargada de diamante	500 g	Todos los materiales

el control de calidad y la correlación con otras propiedades de los materiales. Por ejemplo, la dureza de Brinell se relaciona con la resistencia a la tensión del acero por medio de la relación:

$$\text{Resistencia a la tensión (psi)} = 500DB \quad (6-23)$$

donde DB tiene unidades de kg/mm^2 .

La dureza se correlaciona bien con la resistencia al desgaste. Está disponible una prueba por separado para medir la resistencia al desgaste. Un material utilizado en la fragmentación o molido de minerales debe ser muy duro para asegurar que el material no sea erosionado o desgastado por las materias primas duras. De manera similar, los dientes de un engranaje en el sistema de transmisión o de impulsión de un vehículo deben ser lo suficientemente duros para que los dientes no se desgasten. Por lo regular se encuentra que los materiales poliméricos son blandos de manera excepcional, los metales y aleaciones poseen una dureza intermedia y las cerámicas son excepcionalmente duras. Se utilizan materiales como el compuesto de carburo de tungsteno-cobalto (WC-Co), conocido como "carburo", para aplicaciones en herramientas de corte. También se utiliza el diamante microcristalino o materiales de carbono parecidos al diamante (CPD) para herramientas de corte y otras aplicaciones.

La prueba de dureza de Knoop (DK) es una **prueba de microdureza**, que forma indentaciones tan pequeñas que se requiere un microscopio para obtener la medición. En estas pruebas, la carga aplicada es menor a 2 N. La prueba de Vickers, la cual utiliza un penetrador de pirámide de diamante, puede llevarse a cabo como una prueba de macro o microdureza. Las pruebas de microdureza son adecuadas para materiales que pueden poseer una superficie que tiene una dureza mayor que el núcleo, materiales en los que las distintas áreas muestran niveles de dureza diferentes, o en muestras que no son macroscópicamente planas.

6-8 Nanoindentación

Las pruebas de dureza descritas en la sección anterior se conocen como pruebas de macro o microdureza debido a que las indentaciones tienen dimensiones en el orden de milímetros o micrones (micras). Las ventajas de tales pruebas son que son relativamente rápidas, fáciles y económicas. Algunas de las desventajas es que sólo pueden utilizarse en muestras a macroescala y la dureza es la única propiedad de los materiales que puede medirse de manera directa. La nanoindentación es la prueba de dureza llevada a cabo en la escala de longitud nanométrica. Se utiliza una punta pequeña de diamante para indentar el material de interés. La carga impuesta y el desplazamiento se miden de manera continua con una resolución de micronewtons y subnanómetros, respectivamente. La carga y el desplazamiento se miden a través del proceso de indentación. Las técnicas de nanoindentación son importantes para la medición de las propiedades mecánicas de películas delgadas en sustratos (como en aplicaciones microelectrónicas) y de materiales en nanofase y para la deformación de estructuras a micro y nanoescala que se sitúan de manera libre. La nanoindentación puede llevarse a cabo con una precisión alta en el posicionamiento, permitiendo indentaciones dentro de granos seleccionados de un material. Los nanoindentadores incorporan microscopios ópticos y en algunas ocasiones una capacidad de microscopio de sondeo de barrido. La dureza y el módulo de elasticidad se miden utilizando la nanoindentación.

Las puntas de los nanopenetradores vienen en una variedad de formas. A una forma común se le conoce como penetrador de Berkovich, el cual es una pirámide con tres lados. En la figura 6-20 se muestra una indentación realizada por un penetrador de Berkovich. La indentación en la figura mide $12.5 \mu\text{m}$ en cada lado y tiene una profundidad de alrededor de $1.6 \mu\text{m}$.

La primera etapa de una prueba de nanoindentación involucra el desarrollo de indentaciones sobre un patrón de calibración. La sílice fundida es un patrón de calibración común,

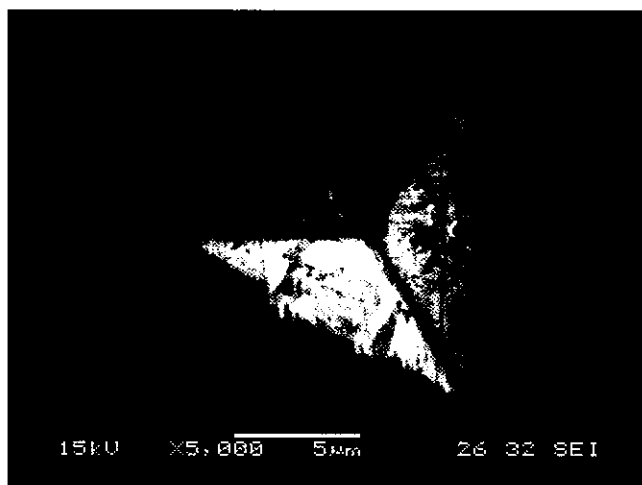


Figura 6-20 Indentación en un vidrio metálico voluminoso de $\text{Zr}_{41.2}\text{Ti}_{13.8}\text{Cu}_{12.5}\text{Ni}_{10.0}\text{Be}_{22.5}$ realizada utilizando una punta de Berkovich en un nanopenetrador. (Cortesía de Gang Feng, Villanova University.)

debido a que tiene propiedades mecánicas homogéneas y bien caracterizadas (módulo de elasticidad $E = 72$ GPa y razón de Poisson $\nu = 0.17$). El propósito de efectuar indentaciones sobre el estándar de calibración es determinar el área de contacto proyectada de la punta del penetrador A_c como una función de la profundidad de la indentación. Para una punta de Berkovich perfecta,

$$A_c = 24.5 h_c^2 \quad (6-24)$$

Esta función relaciona el área de la sección transversal del penetrador con la distancia de la punta h_c que está en contacto con el material que se está indentando. La punta no está perfectamente afilada y se desgasta y cambia de forma con cada uso. Por tanto, debe llevarse a cabo una calibración cada vez que la punta se utiliza como se explicará más adelante.

La profundidad total de la indentación h (medida por el desplazamiento de la punta) es la suma de la profundidad de contacto h_c y la profundidad h_s en la periferia de la indentación donde el indentador no hace contacto con la superficie del material, es decir,

$$h = h_c + h_s \quad (6-25)$$

como se muestra en la figura 6-21. El término del desplazamiento de la superficie h_s se calcula de acuerdo con

$$h_s = \varepsilon \frac{P_{\text{máx}}}{S} \quad (6-26)$$

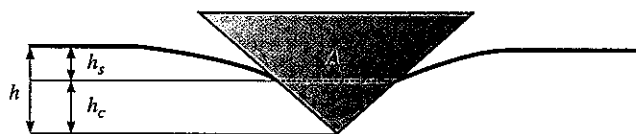


Figura 6-21 Relación entre la profundidad total de la indentación h , profundidad del contacto h_c y el desplazamiento de la superficie en la periferia de la indentación h_s . En esta vista lateral se observa el área de contacto A_c a una profundidad h_c . [(Según W. C. Oliver y G. M. Pharr en *Journal of Materials Research*, vol. 7, núm. 6, p. 1573(1992). Reimpresa con permiso).]

donde $P_{\text{máx}}$ es la carga máxima y s es una constante geométrica igual a 0.75 para un penetrador de Berkovich. S es la rigidez al descargar.

En una nanoindentación, la carga impuesta se mide como una función de la profundidad de la indentación h , como se muestra en la figura 6-22. En la carga, la deformación es elástica y plástica. A medida que se quita el penetrador del material, la recuperación es elástica. La rigidez al descargar se mide como la pendiente de una curva de la ley de potencias ajustada a la curva de la descarga a la profundidad máxima de la indentación. El módulo elástico reducido E_r se relaciona con la rigidez al descargar S de acuerdo con

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta} \frac{S}{\sqrt{A_c}} \quad (6-27)$$

donde β es una constante para la forma del penetrador que se está utilizando ($\beta = 1.034$ para un penetrador de Berkovich). El módulo reducido E_r está dado por

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \quad (6-28)$$

donde E y ν son el módulo elástico y la razón de Poisson del material que se está indentando, respectivamente y E_i y ν_i son el módulo elástico y la razón de Poisson del penetrador, respectivamente (para el diamante, $E_i = 1.141$ TPa y $\nu_i = 0.07$). Dado que se conocen las propiedades elásticas del patrón, la única incógnita en la ecuación 6-27 para la calibración de la indentación es A_c .

Utilizando la ecuación 6-27, el área de contacto proyectada se calcula para una profundidad de contacto particular. Cuando el experimento se lleva a cabo de manera subsecuente sobre el material de interés, la misma función de la forma de la punta se utiliza para calcular el área de contacto proyectada para la misma profundidad de contacto. La ecuación 6-27 se utiliza de nuevo con el módulo elástico de material que es la cantidad desconocida de interés. (Debe suponerse una razón de Poisson para el material que se está indentando. Como se vio en la tabla 6-3, los valores comunes van de 0.2 a 0.4 con la mayoría de los metales que tienen una razón de Poisson de alrededor de 0.3. Los errores en esta suposición dan por resultado un error relativamente pequeño en la medición del módulo elástico.)

La dureza de un material determinada por la nanoindentación se calcula como

$$H = \frac{P_{\text{máx}}}{A_c} \quad (6-29)$$

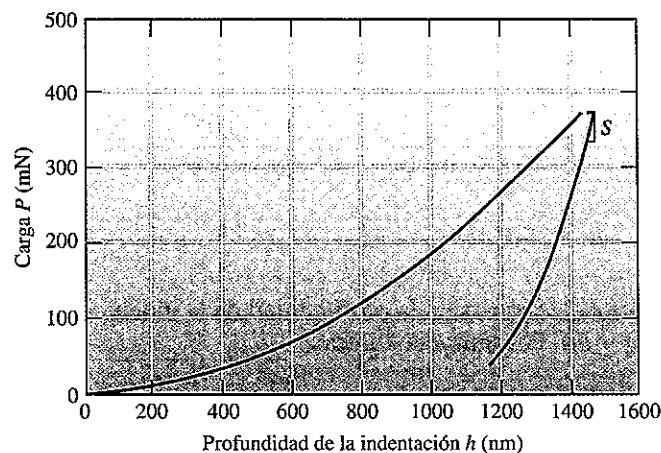


Figura 6-22 La carga como una función de la profundidad de la indentación para una nanoindentación del MgO. Se indica la rigidez al descargar S a la carga máxima.

La dureza (determinada por la nanoindentación) por lo regular se reporta con unidades GPa y los resultados de indentaciones múltiples por lo general se promedian para incrementar la precisión.

Este análisis calcula el módulo elástico y la dureza a la carga máxima; sin embargo, actualmente se emplea de modo normal una técnica experimental conocida como nanoindentación dinámica. Durante ésta, se superpone una carga oscilante pequeña sobre la carga total en la muestra. De esta manera, la muestra se descarga de manera elástica continuamente a medida que se incrementa la carga total. Esto permite mediciones continuas del módulo elástico y de la rigidez como una función de la profundidad de la indentación.

Este análisis por nanoindentación fue publicado en 1992 en el *Journal of Materials Research* y se conoce como el método de Oliver y Pharr, nombrado en honor de Warren C. Oliver y George M. Pharr.

Ejemplo 6-7 Nanoindentación del MgO

La figura 6-22 muestra los resultados de una indentación en el MgO monocristalino (001) utilizando un penetrador de diamante de Berkovich. La rigidez en la descarga a una profundidad de indentación máxima de $1.45 \mu\text{m}$ es $1.8 \times 10^6 \text{ N/m}$. Una calibración sobre la sílice fundida indica que el área de contacto proyectada a la profundidad de contacto correspondiente es de $41 \mu\text{m}^2$. La razón de Poisson del MgO es de 0.17. Calcule el módulo elástico y la dureza del MgO.

SOLUCIÓN

$$\text{El área de contacto proyectada } A_c = 41 \mu\text{m}^2 \times \frac{(1 \text{ m})^2}{(10^6 \mu\text{m})^2} = 41 \times 10^{-12} \text{ m}^2$$

El módulo reducido está dado por

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta} \frac{S}{\sqrt{A_c}} = \frac{\sqrt{\pi}(1.8 \times 10^6 \text{ N/m})}{2(1.034)\sqrt{(41 \times 10^{-12} \text{ m}^2)}} = 241 \times 10^9 \text{ N/m}^2 = 241 \text{ GPa}$$

Al sustituir la razón de Poisson del MgO y las constantes elásticas del diamante y resolviendo para E ,

$$\begin{aligned} \frac{1}{E_r} &= \frac{1 - 0.17^2}{E} + \frac{1 - 0.07^2}{1.141 \times 10^{12} \text{ Pa}} = \frac{1}{241 \times 10^9 \text{ Pa}} \\ \frac{0.9711}{E} &= \frac{1}{241 \times 10^9 \text{ Pa}} - \frac{1 - 0.07^2}{1.141 \times 10^{12} \text{ Pa}} \\ E &= 296 \text{ GPa} \end{aligned}$$

A partir de la figura 6-22, la carga a la profundidad de la indentación de $1.45 \mu\text{m}$ es de 380 mN ($380 \times 10^{-3} \text{ N}$). Por tanto, la dureza es

$$H = \frac{P_{\text{máx}}}{A_c} = \frac{380 \times 10^{-3} \text{ N}}{41 \times 10^{-12} \text{ m}^2} = 9.3 \times 10^9 \text{ Pa} = 9.3 \text{ GPa}$$

6-9 Efectos de la rapidez de deformación y comportamiento al impacto

Cuando un material se sujeta a un golpe intenso y repentino, en el que la rapidez de deformación ($\dot{\gamma}$ o $\dot{\epsilon}$) es extremadamente rápida, puede comportarse de una manera mucho más quebradiza que la observada en la prueba (ensayo) de tensión. Por ejemplo, esto puede observarse en muchos plásticos y materiales como el Silly Putty®. Si estira un plástico como el polietileno o el Silly Putty® de manera muy lenta, las moléculas del polímero tienen tiempo para desenredarse o las cadenas de deslizarse entre sí y ocasionar deformaciones plásticas grandes. Sin embargo, si se aplica una carga de impacto, no hay tiempo suficiente para que estos mecanismos desempeñen una función y los materiales se rompen de una manera quebradiza. Con frecuencia se utiliza una **prueba (ensayo) de impacto** para evaluar la fragilidad de un material bajo estas condiciones. En contraste con la prueba de tensión, en esta prueba las rapidezces de deformación son mucho mayores ($\dot{\epsilon} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$).

Se han diseñado varios procedimientos de prueba, incluyendo la prueba de *Charpy* y la prueba de *Izod* (figura 6-23). La prueba de Izod se utiliza con frecuencia para los materiales plásticos. El espécimen de la prueba puede o no tener una muesca; los especímenes con muesca en V miden mejor la resistencia del material a la propagación del agrietamiento.

En esta prueba, un péndulo pesado comienza a una elevación h_0 , se balancea a través de su arco, golpea y rompe el espécimen y alcanza una elevación final menor h_f . Si se conocen las elevaciones inicial y final del péndulo, se puede calcular la diferencia en energía potencial. Esta diferencia es la **energía de impacto** absorbida por el espécimen durante la falla. Para la prueba de Charpy, la energía se expresa por lo general en pies-libras ($\text{ft} \cdot \text{lb}$) o en joules (J), donde $1 \text{ ft} \cdot \text{lb} = 1.356 \text{ J}$. Los resultados de la prueba de Izod se expresan en unidades de $\text{ft} \cdot \text{lb/pulg}$ o J/m . A la habilidad de un material para soportar un golpe de impacto con frecuencia se refiere como **tenacidad de impacto** del material. Como se mencionó anteriormente, en algunas ocasiones se considera el área bajo la curva esfuerzo-deformación verdaderos o ingenieriles como una medida

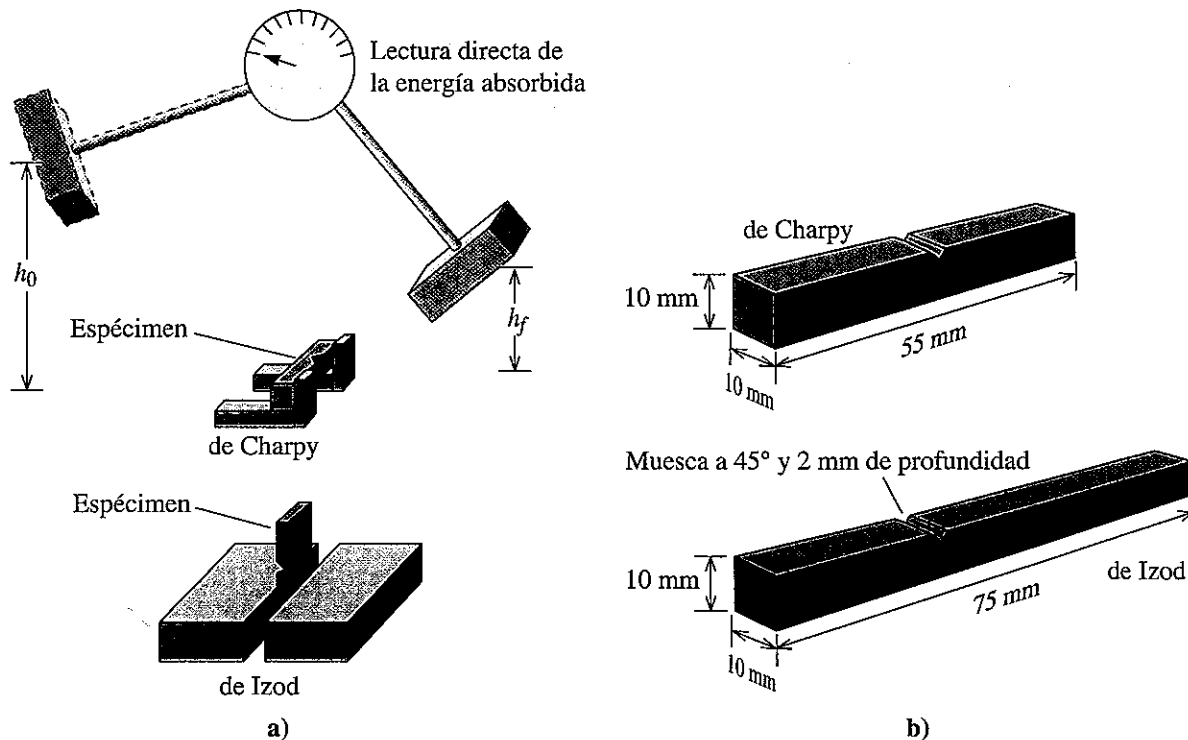


Figura 6-23 Prueba de impacto: a) pruebas de Charpy y de Izod y b) dimensiones de los especímenes comunes.

de la **tenacidad a la tensión**. En ambos casos, se mide la energía necesaria para fracturar un material. La diferencia es que, en las pruebas de tensión, las rapidezces de deformación son mucho menores en comparación con las utilizadas en una prueba de impacto. Otra diferencia es que en una prueba de impacto por lo regular se trata con materiales que tienen una muesca. La **tenacidad a la fractura** de un material se define como la habilidad de un material que contiene imperfecciones para soportar una carga aplicada. En el capítulo 7 se explicará la tenacidad a la fractura.

6-10 Propiedades obtenidas a partir de la prueba de impacto

En la figura 6-24 se muestra una curva que muestra las tendencias en los resultados de una serie de pruebas de impacto desarrolladas sobre el nailon a varias temperaturas. En la práctica, las pruebas se conducen a un número limitado de temperaturas.

Temperatura de transición de dúctil a quebradizo (TTDQ)

Es la temperatura a la cual el modo de falla de un material cambia de fractura dúctil a quebradiza. Esta temperatura puede definirse por medio de la energía promedio entre las regiones dúctil y quebradiza, a alguna energía absorbida específica o por medio de alguna aparición de una fractura característica. Un material sujeto a un golpe de impacto durante el servicio debe tener una temperatura de transición *por debajo* de la temperatura del entorno del material.

No todos los materiales tienen una temperatura de transición distintiva (figura 6-25). Los metales CCCu tienen temperaturas de transición, pero la mayoría de los metales CCCa no. Los metales CCCa tienen energías absorbidas altas, con la energía disminuyendo de manera gradual y, en algunas ocasiones, incluso aumentando a medida que la temperatura disminuye. Como se mencionó anteriormente, el efecto de esta transición en el acero pudo haber contribuido a la falla del *Titanic*.

En los materiales poliméricos, la temperatura de transición de dúctil a quebradizo está estrechamente relacionada con la temperatura de transición vítrea y para propósitos prácticos se trata como la misma. Como se mencionó anteriormente, la temperatura de transición de los polímeros utilizados en los anillos selladores en el cohete propulsor y otros factores condujeron al desastre del *Challenger*.

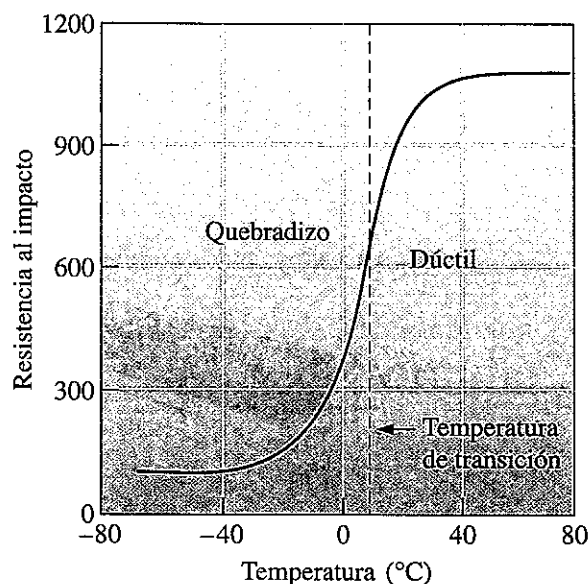
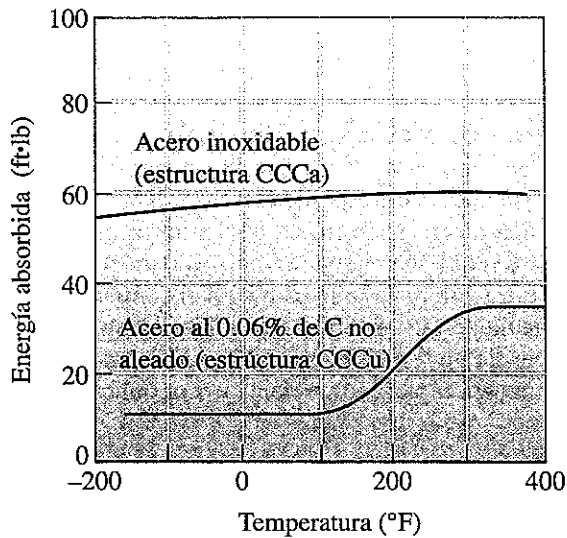


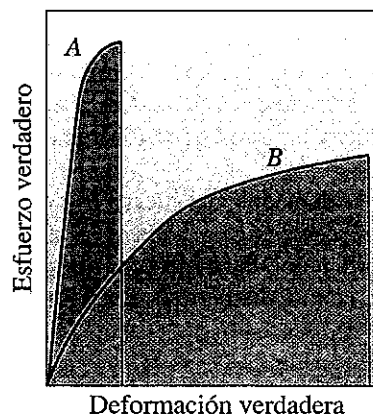
Figura 6-24
Resultados a partir de una serie de pruebas de impacto de Izod para un polímero termoplástico de nailon duro.

**Figura 6-25**

Propiedades de la muesca en V de Charpy para un acero al carbono CCCu y un acero inoxidable CCCa. La estructura cristalina CCCa por lo regular conduce a energías absorbidas más altas y a ninguna temperatura de transición.

Sensibilidad a la muesca La muesca ocasionada por un maquinado, una fabricación o un diseño deficientes concentra los esfuerzos y reduce la tenacidad de los materiales. La **sensibilidad a la muesca** de un material puede evaluarse comparando las energías absorbidas de la muesca en función de los especímenes sin muesca. Las energías absorbidas son mucho menores en los especímenes con muesca si el material es sensible a la muesca. En la sección 7-7 se explicará cómo afecta la presencia de muescas el comportamiento de los materiales sujetos a un esfuerzo cíclico.

Relación con el diagrama de esfuerzo-deformación La energía requerida para romper un material durante la prueba de impacto (es decir, la tenacidad de impacto) no siempre está relacionada con la tenacidad a la tensión (es decir, el área contenida bajo la curva de esfuerzo-deformación verdaderos (figura 6-26)). Como se indicó anteriormente, los ingenieros con frecuencia consideran el área bajo la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles como la tenacidad a la tensión. En general, los metales con resistencia y ductilidad altas tienen buena tenacidad a la tensión; sin embargo, éste no es siempre el caso cuando las rapidezces de deformación son altas. Por ejemplo, los metales que muestran una tenacidad a la tensión excelente pueden mostrar un comportamiento quebradizo bajo rapidezces de deformación altas (es decir, pueden mostrar una tenacidad de impacto deficiente). Por tanto, la rapidez de la deformación impuesta puede desplazar la transición de dúctil a quebradizo. Las cerámicas y muchos compuestos por lo general tienen mala tenacidad, aun cuando

**Figura 6-26**

El área contenida bajo la curva de esfuerzo verdadero-deformación verdadera está relacionada con la tenacidad a la tensión. Aunque el material B tiene una resistencia a la fluencia menor, absorbe más energía que el material A. Las energías a partir de estas curvas pueden no ser iguales a las obtenidas a partir de la información de la prueba de impacto.

tienen una resistencia alta, debido a que virtualmente no muestran ductilidad. Estos materiales muestran tenacidad a la tensión y tenacidad de impacto deficientes.

Uso de las propiedades de impacto La energía absorbida y la TTDQ son muy sensibles a las condiciones de carga. Por ejemplo, una rapidez más alta de la aplicación de energía al espécimen reduce la energía absorbida e incrementa la TTDQ. El tamaño del espécimen también afecta los resultados; debido a que es más difícil para un material grueso deformarse, se requieren energías menores para romper los materiales más gruesos. Por último, la configuración de la muesca afecta el comportamiento; una grieta en la superficie puntiaguda y afilada permite energías absorbidas menores que las de una muesca en V. Debido a que con frecuencia no se pueden predecir o controlar todas estas condiciones, la prueba de impacto es una manera rápida, conveniente y económica para comparar distintos materiales.

Ejemplo 6-8

Diseño de un mazo

Diseñe un mazo de ocho libras para clavar postes para una cerca de acero en el suelo.

SOLUCIÓN

Primero, se deben considerar los requerimientos del diseño que coincidan con el mazo. Una lista parcial incluiría:

1. El mango debe ser ligero en peso, pero lo suficientemente duro para que no se rompa de manera estrepitosa.
2. La cabeza no debe romperse o astillarse durante el uso, aun en temperaturas bajo cero.
3. La cabeza no debe deformarse durante el uso continuo.
4. La cabeza debe ser lo suficientemente grande para asegurar que el usuario no falle el poste para cerca y no debe incluir muescas filosas que podrían ocasionar astillado.
5. El mazo debe ser económico.

Aunque el mango pudiera ser de un material compuesto duro y ligero (como un polímero reforzado con fibras Kevlar (un polímero especial)), un mango de madera de alrededor de 30 pulg de largo sería mucho más barato y seguiría proveyendo la tenacidad suficiente. Como se muestra posteriormente en el capítulo 17, la madera puede categorizarse como un compuesto reforzado con fibras naturales.

Para producir la cabeza se prefiere un material que tenga una temperatura de transición baja, que pueda absorber una energía relativamente alta durante el impacto y que también posea la dureza suficiente para evitar su deformación. El requerimiento de tenacidad descartaría la mayoría de las cerámicas. Un metal cúbico centrado en la cara, como el acero inoxidable o el cobre CCCa, podría proveer una tenacidad superior aun a temperaturas bajas; sin embargo, estos metales son relativamente blandos y costosos. Una elección apropiada podría ser un acero CCCu. Los aceros ordinarios son baratos, tienen dureza y resistencia buenas y algunos tienen la tenacidad suficiente a temperaturas bajas.

En el apéndice A, se encuentra que la densidad del hierro es de 7.87 g/cm^3 o de 0.28 lb/pulg^3 . Se supone que la densidad del acero es casi la misma. El volumen del acero requerido es de $V = 8 \text{ lb} / (0.28 \text{ lb/pulg}) = 28.6 \text{ pulg}^3$. Para asegurar que golpeará el blanco, la cabeza podría tener una forma cilíndrica, con un diámetro de 2.5 pulg. La longitud de la cabeza sería entonces de 5.8 pulg.

6-11 Vidrios metálicos voluminosos y su comportamiento mecánico

Los metales, como se encuentran en la naturaleza, son cristalinos; sin embargo, cuando aleaciones particulares de muchos componentes se enfrían rápidamente, pueden formarse metales amorfos. Algunas aleaciones requieren de rapidez de enfriamiento tan altas como 10^6 K/s para formar una estructura amorfa ("o vidriosa"), pero recientemente se han encontrado nuevas composiciones que requieren rapidez de enfriamiento en el orden de sólo unos cuantos grados por segundo. Esto ha permitido la producción de los llamados "vidrios metálicos voluminosos"—vidrios metálicos con grosores o diámetros tan grandes de hasta 5 cm (2 pulg).

Antes del desarrollo de los vidrios metálicos voluminosos, los metales amorfos se producían por medio de una variedad de técnicas de solidificación rápida, incluyendo un proceso conocido como hilatura por fusión. En la hilatura por fusión, el metal líquido se vierte en carretes enfriados que rotan e "hilan" cintas delgadas en el orden de $10\ \mu\text{m}$ de grosor. Es difícil llevar a cabo pruebas mecánicas sobre cintas; por tanto, el desarrollo de vidrios metálicos voluminosos permite pruebas mecánicas que anteriormente no eran posibles. Los vidrios metálicos voluminosos pueden producirse por medio de varios métodos. Un método involucra el uso de un arco eléctrico para fusionar elementos de pureza alta y después el colado por aspiración o por vertido en moldes de cobre enfriados.

Como se muestra en la figura 6-27, los vidrios metálicos exhiben fundamentalmente un comportamiento de esfuerzo-deformación distinto del de otras clases de materiales. Lo más notable es que los vidrios metálicos son materiales con una resistencia alta excepcional. Por lo regular tienen resistencias a la fluencia en el orden de 2 GPa (290 ksi), comparables con las de los aceros con las resistencias más altas, y se han reportado resistencias a la fluencia de hasta 5 GPa (725 ksi) para aleaciones metálicas amorfas basadas en hierro. Dado que los vidrios metálicos no son cristalinos, no contienen dislocaciones. Como se aprendió en el capítulo 4, las dislocaciones conducen a resistencias a la fluencia que son menores a las pronosticadas de manera teórica para los materiales cristalinos perfectos. Las resistencias altas de los vidrios metálicos se deben a la falta de dislocaciones en su estructura amorfa.

A pesar de sus resistencias altas, por lo general los vidrios metálicos son quebradizos. La mayoría de los vidrios metálicos exhiben una deformación plástica casi de cero en tensión

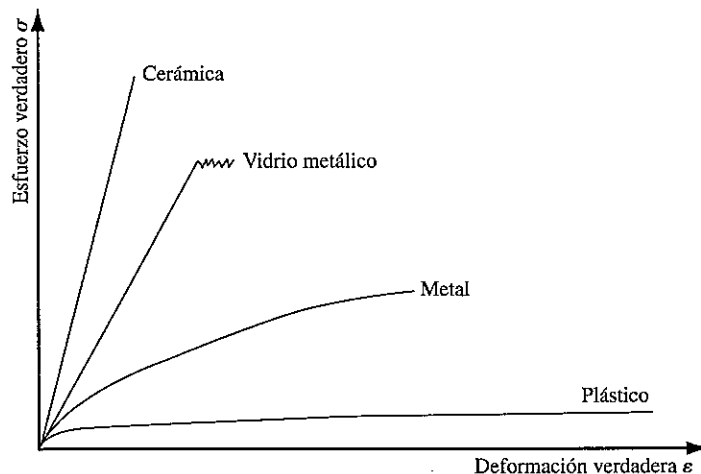
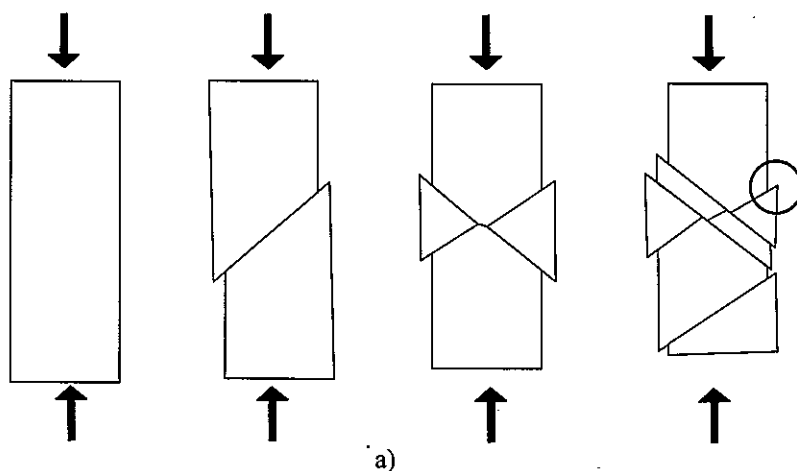


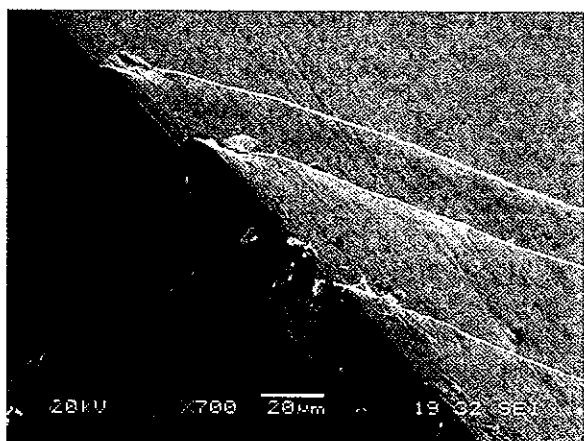
Figura 6-27 Diagrama esquemático del comportamiento esfuerzo-deformación en compresión de varios materiales de ingeniería incluyendo los vidrios metálicos. El flujo dentado se observa en la región plástica.

y sólo un bajo porcentaje de deformación plástica en compresión (en comparación con las decenas de porcentaje de deformación plástica para los metales cristalinos). Esta falta de ductilidad está relacionada con la falta de dislocaciones. Dado que los vidrios metálicos no contienen dislocaciones, no se endurecen por trabajo (es decir, el esfuerzo no aumenta con la deformación después de que ha comenzado la deformación plástica, como se muestra en la figura 6-27. En el capítulo 8 se explicará a detalle el endurecimiento por trabajo, conocido como endurecimiento por deformación). Por tanto, cuando la deformación se vuelve localizada, se intensifica y conduce rápidamente a la falla.

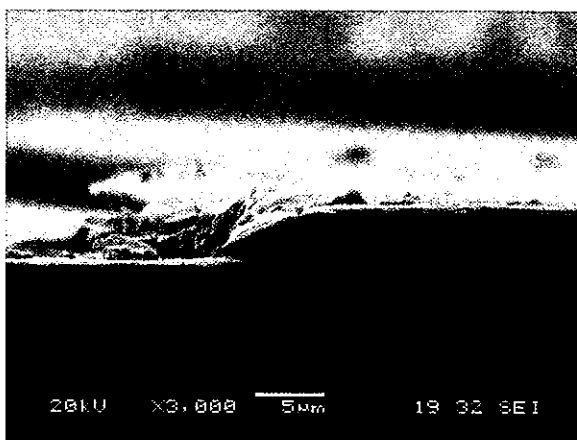
A temperatura ambiente los vidrios metálicos se deforman de manera permanente a través del cortante intenso en bandas estrechas del material de alrededor de 10 a 100 nm de grosor. Esto crea desplazamientos cortantes en los bordes del material, como se muestra en la figura 6-28. Para el caso de la compresión, esto da por resultado una disminución en la longitud en la dirección del eje de carga. A medida que procede la plasticidad, se forman más bandas cortantes y se propagan a través de la muestra. Se forman más bandas cortantes para acomodar la deformación plástica creciente hasta que por último una de estas bandas cortantes hace fallar la muestra. En la figura 6-27 se pueden observar los efectos de las bandas cortantes.



a)



b)



c)

Figura 6-28 a) Diagrama esquemático de la formación de bandas cortantes en un vidrio metálico que muestra las etapas sucesivas de una prueba de compresión. b) Micrografía electrónica de barrido que muestra tres bandas cortantes en el vidrio metálico voluminoso de $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10.0}Be_{22.5}$. Las flechas indican la dirección de la carga. c) Micrografía electrónica de barrido del desplazamiento de una banda cortante en un vidrio metálico voluminoso de $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10.0}Be_{22.5}$. La localización de tal desplazamiento se encierra en un círculo en a). (Fotografías cortesía de Wendelin Wright.)

Cuando se deforma por compresión una muestra de un vidrio metálico a una rapidez de desplazamiento constante, la carga (o esfuerzo) disminuye a medida que se propagan las bandas cortantes. Esto conduce al comportamiento de esfuerzo-deformación "dentado" mostrado en la figura. Aunque algunos materiales cristalinos muestran comportamiento dentado, el origen de este fenómeno es completamente diferente en los metales amorfos. Los esfuerzos de investigación actuales se centran en la comprensión del proceso de formación de bandas cortantes en los vidrios metálicos y en la prevención de que las bandas cortantes ocasionen la falla de la muestra.

Los vidrios metálicos tienen aplicaciones en el equipamiento deportivo, cubiertas electrónicas, componentes de defensa y como materiales estructurales. Los vidrios metálicos son casi adecuados como recubrimientos industriales debido a su dureza alta y buena resistencia a la corrosión (de nuevo debido a la falta de dislocaciones en la estructura). Todas las aplicaciones potenciales deben utilizar bien los vidrios metálicos muy por debajo de sus temperaturas de transición vítrea dado que se cristalizarán y perderán su comportamiento mecánico único a temperaturas elevadas.

6-12 Comportamiento mecánico a escalas de longitud pequeñas

Con el desarrollo de películas delgadas en sustratos para aplicaciones microelectrónicas y la síntesis de estructuras con dimensiones a escala nanométrica, los científicos de materiales han observado que los materiales pueden mostrar propiedades mecánicas diferentes dependiendo de la escala de longitud a la que se estén probando los materiales. Se han desarrollado varias técnicas experimentales para medir el comportamiento mecánico a escalas de longitud pequeñas. La nanoindentación, la cual se explicó en la sección 8, se utiliza para este propósito. Otra técnica se conoce como análisis de la curvatura de la oblea.

En la técnica de curvatura de la oblea se cicla la temperatura de una película delgada en un sustrato, por lo regular de la temperatura ambiente a varios cientos de grados Celsius. Dado que la película delgada y el sustrato tienen coeficientes de expansión térmica distintos, se expanden (o contraen) a rapidezces diferentes. Esto induce esfuerzos en la película delgada. Estos esfuerzos en la película son directamente proporcionales al cambio en la curvatura del sistema película-sustrato a medida que se cicla la temperatura. En la figura 6-29a) se muestra un ejemplo de un experimento de curvatura de la oblea para una película delgada de aluminio policristalino de $0.5 \mu\text{m}$ en un sustrato de silicio oxidado. El aluminio tiene un coeficiente de expansión térmico mayor que el del silicio.

La figura 6-29b) muestra dos ciclos del experimento. El experimento comienza con el sistema película-sustrato a temperatura ambiente. El aluminio tiene un esfuerzo residual de 30 MPa a temperatura ambiente debido al enfriamiento de la temperatura de procesamiento. Durante el primer ciclo los granos en la película crecen a medida que aumenta la temperatura (capítulo 5). A medida que los granos crecen el área de los límites de los granos disminuye y la película se densifica. Al mismo tiempo, el aluminio se expande de manera más rápida que el silicio y está restringido a la expansión por el sustrato de silicio al cual está enlazado. Por tanto, el aluminio está sujeto a un estado de compresión. A medida que la temperatura aumenta, el aluminio se deforma de manera plástica. El esfuerzo no se incrementa de manera notable, debido a que la elevación de la temperatura ocasiona una disminución en la resistencia.

A medida que el sistema se enfría, el aluminio se contrae más con una disminución en la temperatura de como lo hace el silicio. A medida que el aluminio se contrae, primero se descarga de manera elástica y después se deforma de manera plástica. Conforme la temperatura disminuye, el esfuerzo continúa aumentando hasta que se completa el ciclo cuando se alcanza la temperatura ambiente. Se muestra un segundo ciclo térmico. Los ciclos de temperatura subsecuentes serán similares en forma, dado que la microestructura de la película no cambia a menos que la temperatura más alta exceda la del ciclo previo.

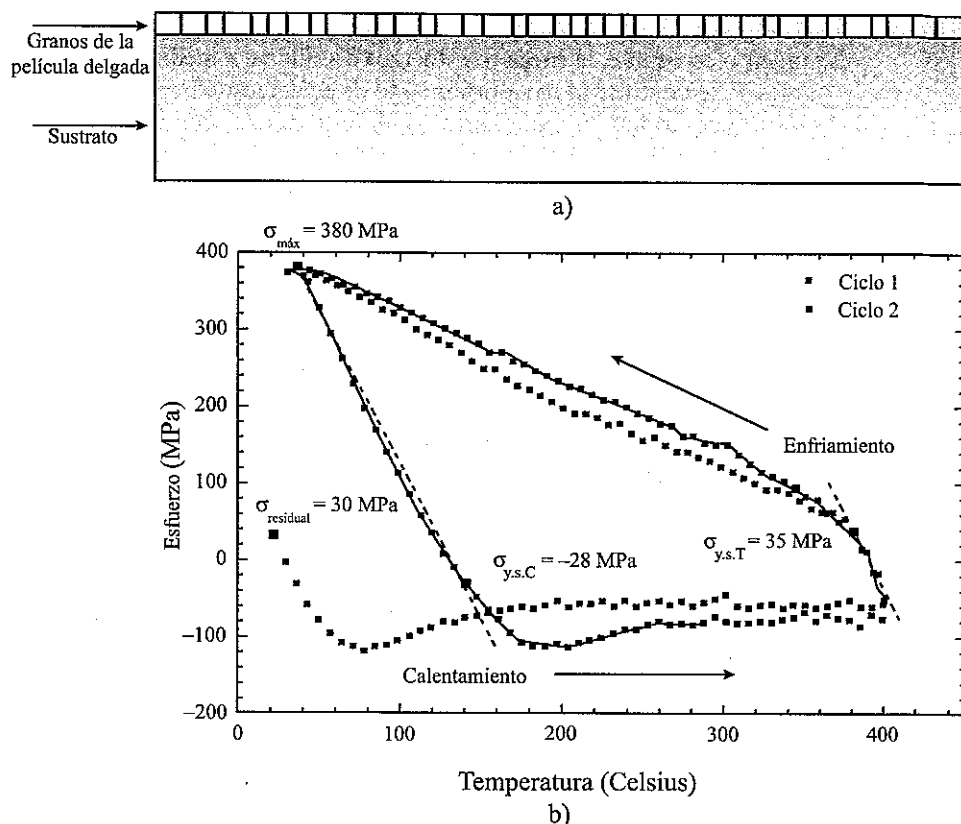


Figura 6-29 a) Diagrama esquemático de una película delgada en un sustrato. Los granos tienen diámetros en el orden del grosor de la película. Observe que las películas delgadas por lo regular tienen grosores de alrededor de $1/500$ del grosor del sustrato (algunas son mucho más delgadas) y, por tanto, este diagrama no está trazado a escala. b) Esfuerzo en función de la temperatura para el proceso cíclico térmico de una película delgada de aluminio policristalino de $0.5 \mu\text{m}$ en un sustrato de silicio oxidado durante un experimento de curvatura de la oblea.

¡Observe que el esfuerzo soportado por el aluminio a temperatura ambiente después del proceso cíclico es de 380 MPa! El aluminio voluminoso puro (aluminio con dimensiones macroscópicas) sólo es capaz de soportar una fracción de este esfuerzo sin fallar. Por tanto, se ha observado una tendencia general en la ciencia de materiales: ¡en los metales cristalinos, más pequeño es más resistente!

En general, la clave para la resistencia de un metal cristalino son las dislocaciones. A medida que la resistencia al movimiento de las dislocaciones se incrementa, la resistencia del metal también aumenta. Un mecanismo para el fortalecimiento en los metales cristalinos a micro y nanoescala es el tamaño de los granos. El tamaño de los granos de las películas delgadas tiende a estar en el orden del grosor de la película, como se muestra en la figura 6-29a). A medida que el tamaño de los granos disminuye, aumenta la resistencia a la fluencia (vea el capítulo 4, sección 7 para una explicación de la ecuación de Hall-Petch).

Las dislocaciones distorsionan el cristal circundante, aumentando la energía de la deformación en los enlaces atómicos. Por tanto, las dislocaciones tienen energías asociadas con ellas. Para todos los metales, a medida que la densidad de las dislocaciones aumenta (o la cantidad de la longitud de las dislocaciones por unidad de volumen en el cristal), aumenta esta energía.

En las películas delgadas, las dislocaciones pueden confinarse en la interfaz entre la película delgada y el sustrato al que está enlazado. Por tanto, es necesario que la dislocación aumente en longitud a lo largo de la interfaz para que se propague y para que la película delgada se deforme de manera plástica. El incremento en la longitud de las dislocaciones requiere

energía y el esfuerzo requerido para ocasionar que la dislocación se propague es mayor que la que se requeriría para una dislocación que no está restringida por una interfaz. Este esfuerzo es inversamente proporcional al grosor de la película; por tanto, a medida que el grosor de la película disminuye, la resistencia aumenta. Cuando dos superficies restringen la dislocación, como cuando una capa pasivada (es decir, una que protege la superficie de la película delgada de la oxidación o corrosión) se deposita sobre la película delgada, el efecto es aun más pronunciado. Esta relación inversa entre la resistencia y el grosor de la película es independiente del efecto de los tamaños de los granos explicado anteriormente. Recuerde: cualquier mecanismo que interfiere con el movimiento de las dislocaciones hace más resistente al metal.

Para inducir un cambio de forma no uniforme en un material, como la flexión de una barra o la indentación de un material, deben introducirse dislocaciones en la estructura cristalina. A tales dislocaciones se les llama *dislocaciones necesarias de manera geométrica*. Estas dislocaciones existen además de las dislocaciones (conocidas como *dislocaciones almacenadas de manera estadística*) que son producidas por una deformación homogénea; por tanto, se incrementa la densidad de las dislocaciones. A escalas de longitud pequeñas (como para las indentaciones pequeñas hechas utilizando un nanopenetrador), la densidad de las dislocaciones necesarias de manera geométrica es significativa, pero a escalas de longitud mayores, el efecto es disminuido. Por tanto, la dureza de las indentaciones poco profundas es mayor que la dureza de las indentaciones profundas hechas en el mismo material. Como aprenderá en el capítulo 8, a medida que la densidad de las dislocaciones aumenta, la resistencia de un metal se incrementa. Las dislocaciones actúan como obstáculos para la propagación de otras dislocaciones y de nuevo, cualquier mecanismo que interfiere con el movimiento de las dislocaciones hace más resistente al metal.

Un experimento de prueba mecánica incrementalmente común involucra la fabricación de especímenes de compresión con diámetro en el orden de 1 micrón utilizando una herramienta conocida como haz enfocado de iones. En esencia, se utiliza un haz de iones galio para sustraer átomos de la superficie de un material, por tanto desarrollando un proceso mecanizado a la escala de longitud micrónica y submicrónica. Estos especímenes se deforman después bajo compresión en un nanopenetrador utilizando una punta de golpeo plana. El volumen de tales especímenes está en el orden de $2.5 \mu\text{m}^3$. Se han observado resistencias extraordinarias en pilares monocristalinos hechos de metales. Este tema es un área de investigación activa en la comunidad de materiales.

Resumen

- El comportamiento mecánico de los materiales está descrito por sus propiedades mecánicas, las cuales se miden con pruebas sencillas idealizadas. Estas pruebas se diseñan para representar distintos tipos de condiciones de carga. Las propiedades de un material reportadas en varios manuales son los resultados de estas pruebas. En consecuencia, siempre debe recordarse que los valores de los manuales son resultados promedio obtenidos a partir de pruebas idealizadas y, por tanto, deben utilizarse con cuidado.
- La prueba de tensión describe la resistencia de un material a un esfuerzo de tensión aplicado de manera lenta. Las propiedades importantes incluyen la resistencia a la fluencia (el esfuerzo al que el material comienza a deformarse de manera permanente), la resistencia a la tensión (el esfuerzo que corresponde a la carga aplicada máxima), el módulo de elasticidad (la pendiente de la porción elástica de la curva de esfuerzo-deformación) y el % de elongación y el % de reducción en el área (ambas medidas de la ductilidad del material).
- La prueba de flexión se utiliza para determinar las propiedades de tensión de los materiales quebradizos. Puede obtenerse un módulo de elasticidad y una resistencia a la flexión (similar a una resistencia a la tensión).
- La prueba de dureza mide la resistencia de un material a la penetración y provee una medida de la resistencia al desgaste y a la abrasión del material. Comúnmente se utiliza una variedad de pruebas de dureza, incluyendo las pruebas de Rockwell y de Brinell. Con frecuencia

la dureza puede correlacionarse con las demás propiedades mecánicas, particularmente con la resistencia a la tensión.

- La nanoindentación es una técnica de prueba de dureza que mide de manera continua la carga impuesta y el desplazamiento con una resolución de microneuton y subnanométrica, respectivamente. Las técnicas de nanoindentación son importantes para la medición de las propiedades mecánicas de las películas delgadas en sustratos y materiales en nanofase y para la deformación de estructuras a micro y nanoescala que se sitúan de manera libre. La dureza y el módulo elástico se miden utilizando la nanoindentación.
- La prueba de impacto describe la respuesta de un material a una carga aplicada de manera rápida. Las pruebas de Charpy y de Izod son comunes. Se mide la energía requerida para fracturar el espécimen y puede utilizarse como la base para la comparación de varios metales probados en las mismas condiciones. Además, puede determinarse una temperatura de transición sobre la cual el material falla de una manera dúctil, en vez de una quebradiza.
- Los vidrios metálicos son metales amorfos. Como tales, no contienen dislocaciones. Una falta de dislocaciones conduce a resistencias altas y ductilidades bajas para estos materiales.
- Los metales cristalinos exhiben resistencias más altas cuando sus dimensiones se confinan a micro y nanoescala. El comportamiento mecánico dependiente del tamaño tiene implicaciones críticas para el diseño y la confiabilidad de los materiales en aplicaciones de la nanotecnología.

Glosario

Adelgazamiento por corte (pseudoplásticos) Materiales en los que la viscosidad aparente disminuye con el incremento de la rapidez cortante.

Carga Fuerza aplicada a un material durante la prueba.

Carga de impacto Aplicación de un esfuerzo a una rapidez de deformación muy alta ($\sim > 100 \text{ s}^{-1}$).

Comportamiento reopéctico Materiales que muestran engrosamiento por corte y también una viscosidad aparente que a una rapidez constante cortante aumenta con el tiempo.

Comportamiento tixotrópico Materiales que muestran adelgazamiento por corte y también una viscosidad aparente que a una rapidez de corte constante disminuye con el tiempo.

Deformación elástica Deformación recuperable por completo y de manera instantánea en un material.

Deformación ingenieril Elongación por unidad de longitud calculada utilizando las dimensiones originales.

Deformación o deformación plástica Deformación permanente de un material cuando se le aplica una carga y después se elimina.

Deformación unitaria Elongación por unidad de longitud.

Deformación unitaria elástica Deformación del material que se recupera de manera instantánea cuando se elimina la carga aplicada.

Deformación verdadera Elongación por unidad de longitud calculada utilizando las dimensiones instantáneas.

Deformímetro Dispositivo utilizado para medir la deformación. Un deformímetro consiste por lo general en un alambre fino incrustado en una matriz de polímero. El calibrador de deformación se enlaza al espécimen de prueba y se deforma a medida que el espécimen también se deforma. A medida que el alambre en el deformímetro se deforma, su resistencia cambia. El cambio en la resistencia es directamente proporcional a la deformación.

Dilatante (engrosamiento por corte) Materiales en los cuales la viscosidad aparente aumenta con el incremento de la rapidez cortante.

Ductilidad Habilidad de un material para deformarse de manera permanente sin romperse cuando se le aplica una fuerza.

Elastómeros Plásticos naturales o sintéticos conformados por moléculas con enrollados parecidos a un resorte que conducen a deformaciones elásticas grandes (por ejemplo, el caucho natural y las siliconas).

Energía de impacto Energía requerida para fracturar un espécimen estándar cuando se aplica de repente la carga.

Engrosamiento por corte (dilatante) Materiales en los que la viscosidad aparente aumenta con el incremento de la rapidez de deformación cortante.

Esfuerzo Fuerza por unidad de área sobre la que está actuando la fuerza.

Esfuerzo ingenieril Carga, o fuerza, aplicada dividida entre el área original sobre la que actúa la carga.

Esfuerzo verdadero Carga dividida entre el área instantánea sobre la que actúa la carga.

Extensómetro Instrumento para medir el cambio en longitud de un espécimen de tensión, por tanto permite el cálculo de la deformación. Un extensómetro con frecuencia es un clip que se une a una muestra y se deforma de manera elástica para medir el cambio en longitud.

Fenómeno del punto de fluencia Transición abrupta, observada en algunos materiales, de la deformación elástica al flujo plástico.

Ley de Hooke Relación lineal entre el esfuerzo y la deformación en la porción elástica de la curva de esfuerzo-deformación.

Límite elástico Magnitud del esfuerzo a la que comienza la deformación plástica.

Límite proporcional Nivel de esfuerzo sobre el cual la relación entre el esfuerzo y la deformación no es lineal.

Macro dureza Dureza del volumen de los materiales medido utilizando cargas > 2 N.

Material anelástico (viscoelástico) Material en el que la deformación total desarrollada tiene componentes elástico y viscoso. Parte de la deformación total se recupera de manera similar a la deformación elástica. Sin embargo, una parte se recupera en un periodo de tiempo. Los ejemplos de materiales viscoelásticos incluyen los polímeros fusionados y muchos polímeros incluyendo el Silly Putty®. Por lo regular, el término anelástico se utiliza para materiales metálicos.

Material viscoelástico (o anelástico) Véase Material anelástico.

Material viscoso Un material viscoso es en el que se desarrolla una deformación por un periodo y el material no regresa a su forma original después de que se elimina el esfuerzo.

Micro dureza Dureza de materiales medida por lo regular utilizando cargas menores a 2 N con una prueba como la de Knoop (DK).

Módulo cortante (G) Pendiente de la parte lineal de la curva de esfuerzo cortante-deformación cortante.

Módulo de elasticidad (E) Módulo de Young, o la pendiente de la parte lineal de la curva de esfuerzo-deformación en la región elástica. Es una medida de la rigidez de los enlaces de un material y no depende en gran medida de la microestructura.

Módulo de flexión Módulo de elasticidad calculado a partir de los resultados de una prueba de flexión; es proporcional a la pendiente de la curva de esfuerzo-deflexión.

Módulo de resiliencia (E_r) Energía elástica máxima absorbida por un material cuando se le aplica una carga.

Módulo de Young (E) Pendiente de la parte lineal de la curva de esfuerzo-deformación en la región elástica, lo mismo que el módulo de elasticidad.

Nanoindentación Prueba de dureza llevada a cabo a la escala de longitud nanométrica. La carga impuesta y el desplazamiento se miden con una resolución de micronewton y subnanómetros, respectivamente.

Newtonianos Materiales en los que el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación cortante están linealmente relacionados (por ejemplo, aceite ligero o agua).

No newtonianos Materiales en los que el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación cortante no están linealmente relacionados; estos materiales son adelgazados o engrosados por corte (por ejemplo, polímeros fusionados, lechadas, pinturas, etcétera).

Plástico de Bingham Material con una respuesta mecánica dada por $\tau = G\gamma$ cuando $\tau < \tau_{r.f}$ y $\tau = \tau_{r.f} + \eta\dot{\gamma}$ cuando $\tau \geq \tau_{r.f}$.

Porcentaje de elongación Incremento permanente porcentual total en la longitud de un espécimen debido una prueba de tensión.

Porcentaje de reducción en el área Disminución permanente porcentual total en el área de la sección transversal de un espécimen debido a una prueba de tensión.

Procesamiento de materiales Métodos de maquinación o fabricación utilizados para moldear los materiales (por ejemplo, extrusión, forjado).

Prueba de dureza Mide la resistencia de un material a la penetración por un objeto afilado. Las pruebas de dureza comunes incluyen la prueba de Brinell, la prueba de Rockwell, la prueba de Knoop y la prueba de Vickers.

Prueba de flexión Aplicación de una fuerza al centro de una barra que está soportada en cada extremo para determinar la resistencia de un material a una carga estática o aplicada de manera lenta. Por lo regular se utiliza para materiales quebradizos.

Prueba de impacto Mide la habilidad de un material para absorber la aplicación repentina de una carga sin romperse. Las pruebas de impacto comúnmente utilizadas son las pruebas de Charpy y de Izod.

Prueba de tensión Mide la respuesta de un material a una fuerza uniaxial aplicada de manera lenta. Se obtiene la resistencia a la fluencia, la resistencia a la tensión, el módulo de elasticidad y la ductilidad.

Pseudoplásticos (adelgazamiento por corte) Materiales en los que la viscosidad aparente disminuye con el aumento de la rapidez de corte.

Rapidez de deformación cortante Derivada del tiempo de la deformación cortante. Véase "Rapidez de deformación".

Rapidez de deformación Rapidez a la que se desarrolla la deformación en o es aplicada a un material indicado; se representa por medio de $\dot{\epsilon}$ o $\dot{\gamma}$ para las rapidez de deformación de tensión y cortante, respectivamente. La rapidez de deformación puede tener un efecto sobre un material ya sea que se comporte de una manera dúctil o quebradiza.

Razón de Poisson Negativo de la razón entre las deformaciones lateral y longitudinal en la región elástica.

Rebajo Deformación local que ocasiona la reducción en el área de la sección transversal de un espécimen de tensión. Muchos materiales dúctiles muestran este comportamiento. El esfuerzo ingenieril comienza a disminuir al inicio del rebajo.

Relajación del esfuerzo Disminución en el esfuerzo para un material sostenido bajo deformación constante como una función del tiempo, la cual se observa en los materiales viscoelásticos. La relajación del esfuerzo es distinta de la recuperación dependiente del tiempo de deformación.

Resistencia a la flexión (módulo de ruptura) Esfuerzo requerido para fracturar un espécimen en una prueba de flexión.

Resistencia a la fluencia Valor del esfuerzo obtenido de manera gráfica que describe no más de una cantidad específica de deformación (por lo general, de 0.002). También se le conoce como resistencia a la fluencia compensada.

Resistencia a la fluencia compensada Valor del esfuerzo obtenido de manera gráfica que describe el esfuerzo que no da más que una cantidad específica de deformación plástica. Principalmente útil para el diseño de componentes. También, enunciado de manera sencilla como la resistencia a la fluencia.

Resistencia a la tensión Esfuerzo que corresponde a la carga máxima en una prueba de tensión.

Resistencia máxima a la tensión extrema (RMT) Véase "Resistencia a la tensión".

Rigidez Medida de la resistencia a la deformación elástica de un material. La rigidez es la pendiente de una curva de carga-desplazamiento y es proporcional al módulo elástico. La rigidez depende de la geometría del componente en consideración, mientras que el módulo elástico o de Young es una propiedad del material. Al inverso de la rigidez se le conoce como flexibilidad.

Sensibilidad a la muesca Mide el efecto de una muesca, rayón u otra imperfección sobre las propiedades de un material como la tenacidad o la vida a la fatiga.

Temperatura de transición de dúctil a quebradizo (TTDQ) Temperatura debajo de la cual un material se comporta de manera quebradiza en una prueba de impacto; también depende de la rapidez de deformación.

Temperatura de transición vítrea (T_g) Temperatura debajo de la cual un material que de otra manera sería dúctil se comporta como si fuera quebradizo. Por lo regular, esta temperatura no es fija y es afectada por el procesamiento del material.

Tenacidad a la fractura Resistencia de un material a fallar en la presencia de un defecto.

Tenacidad a la tensión Área bajo la curva de la prueba de tensión de esfuerzo verdadero-deformación verdadera. Es una medida de la energía requerida para ocasionar la fractura bajo las condiciones de la prueba de tensión.

Tenacidad de impacto Energía absorbida por un material, por lo regular con una muesca, durante la fractura, bajo las condiciones de la prueba de impacto.

Trabajo de fractura Área bajo la curva de esfuerzo-deformación, considerado como una medida de la tenacidad a la tensión.

Valor de deformación compensado Valor de la deformación (por ejemplo, 0.002) utilizado para obtener el esfuerzo a la fluencia compensada.

Viscosidad (η) Medida de la resistencia al flujo, definida como la razón del esfuerzo cortante a la rapidez de deformación cortante (unidades de Poise o Pa-s).

Viscosidad aparente Viscosidad obtenida al dividir el esfuerzo cortante entre el valor correspondiente de la rapidez de deformación cortante para ese esfuerzo.

Viscosidad cinemática Razón de la viscosidad y la densidad, con frecuencia expresada en centistokes.

Problemas

Sección 6-1 Importancia tecnológica

- 6-1** Explique la función de las propiedades mecánicas en las aplicaciones de soporte de carga utilizando ejemplos en el mundo real.
- 6-2** Explique la importancia de las propiedades mecánicas en las aplicaciones funcionales (por ejemplo, ópticas, magnéticas, electrónicas, etc.) utilizando ejemplos en el mundo real.
- 6-3** Explique la importancia de la comprensión de las propiedades mecánicas en el procesamiento de materiales.

Sección 6-2 Terminología de las propiedades mecánicas

- 6-4** Defina “esfuerzo ingenieril” y “deformación ingenieril”.
- 6-5** Defina “módulo de elasticidad”.
- 6-6** Defina “deformación plástica” y compárela con la “deformación elástica”.
- 6-7** ¿Qué es la rapidez de deformación? ¿Cómo afecta al comportamiento mecánico de los materiales poliméricos y metálicos?
- 6-8** ¿Por qué el Silly Putty® se rompe cuando se estira de manera rápida?
- 6-9** ¿Qué es un material viscoelástico? Dé un ejemplo.
- 6-10** ¿A qué se refiere con el término “relajación del esfuerzo”?
- 6-11** Defina los términos “viscosidad”, “viscosidad aparente” y “viscosidad cinemática”.
- 6-12** ¿Cuáles dos ecuaciones se utilizan para describir el comportamiento parecido a un plástico de Bingham?
- 6-13** ¿Qué es un material newtoniano? Dé un ejemplo.
- 6-14** ¿Qué es un elastómero? Dé un ejemplo.

6-15 ¿A qué se refiere con los términos materiales “adelgazados por corte” y “engrosados por corte”?

6-16 Muchas pinturas y otras dispersiones no sólo son adelgazadas por corte, sino también tixotrópicas. ¿A qué se refiere con el término “tixotrópico”?

6-17 Dibuje un diagrama esquemático que muestre el desarrollo de una deformación en un material elástico y viscoelástico. Suponga que la carga se aplica a algún tiempo $t = 0$ y se retira a algún tiempo t .

Sección 6-3 Prueba de tensión: uso del diagrama esfuerzo-deformación unitaria

- 6-18** Dibuje las curvas cualitativas de esfuerzo ingenieril-deformación ingenieril para un polímero dúctil, un metal dúctil, una cerámica, un vidrio y un caucho natural. Etiquete los diagramas de manera cuidadosa. Razone su diagrama para cada material.
- 6-19** ¿Qué es el rebajo? ¿Cómo conduce a la reducción en el esfuerzo ingenieril a medida que aumenta el esfuerzo verdadero?
- 6-20** a) Los nanotubos de carbono son uno de los materiales más rígidos y resistentes conocidos por los científicos e ingenieros. Los nanotubos de carbono tienen un módulo elástico de 1.1 TPa (1 TPa = 10^{12} Pa). Si un nanotubo de carbono tiene un diámetro de 15 nm, determine el esfuerzo ingenieril soportado por el nanotubo cuando se sujeta a una carga de tensión de 4 μ N (1 μ N = 10^{-6} N) a lo largo de la longitud del tubo. Suponga que toda el área de la sección transversal del nanotubo es de soporte de carga.

- b) Suponga que el nanotubo de carbono sólo se deforma de manera elástica (no de manera plástica) bajo la carga de $4 \mu\text{N}$. El nanotubo de carbono tiene una longitud de $10 \mu\text{m}$ ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$). ¿Cuál es la elongación de tensión (desplazamiento) del nanotubo de carbono en nanómetros ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)?
- 6-21** Se aplica una fuerza de 850 lb a un alambre de níquel de 0.15 pulg de diámetro que tiene una resistencia a la fluencia de 45 000 psi y una resistencia a la tensión de 55 000 psi. Determine
- si el alambre se deformará de manera plástica y
 - si el alambre experimentará rebajo.
- 6-22** a) Se aplica una fuerza de 100 000 N a una barra de hierro con un área de sección transversal de $10 \times 20 \text{ mm}$ que tiene una resistencia a la fluencia de 400 MPa y una resistencia a la tensión de 480 MPa. Determine si la barra se deformará de manera plástica y si la barra experimentará rebajo.
- b) Calcule la fuerza máxima que puede soportar una barra de Al_2O_3 de 0.2 pulg de diámetro, que tiene una resistencia a la fluencia de 35 000 psi, sin deformación plástica. Expresé su respuesta en libras y en newtons.
- 6-23** Una fuerza de 20 000 N ocasionará que una barra de magnesio de $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ se estire de 10 a 10.045 cm. Calcule el módulo de elasticidad, en GPa y en psi.
- 6-24** Las dimensiones de una barra de polímero son 1 pulg $\times$ 2 pulg $\times$ 15 pulg. El polímero tiene un módulo de elasticidad de 600 000 psi. ¿Qué fuerza se requiere para estirar la barra de manera elástica de 15 a 15.25 pulg?
- 6-25** Una placa de aluminio de 0.5 cm de grosor tiene que soportar una fuerza de 50 000 N sin deformación permanente. Si el aluminio tiene una resistencia a la fluencia de 125 MPa, ¿cuál es el ancho mínimo de la placa?
- 6-26** Un cable de acero de 1.25 pulg de diámetro y 50 ft de largo va a levantar una carga de 20 toneladas. ¿Cuál es la longitud del cable durante el levantamiento? El módulo de elasticidad del acero es de $30 \times 10^6 \text{ psi}$.

Sección 6-4 Propiedades obtenidas a partir de la prueba de tensión y sección 6-5 Esfuerzo verdadero y deformación verdadera

- 6-27** Defina “esfuerzo verdadero” y “deformación verdadera”. Compárelos con el esfuerzo ingenieril y la deformación ingenieril.
- 6-28** Escriba las fórmulas para el cálculo del esfuerzo y la deformación para una muestra sujeta a una prueba de tensión. Suponga que la muestra presenta rebajo.
- 6-29** Deduzca la expresión $\epsilon = \ln(1 + e)$ donde ϵ es la deformación verdadera y e es la deformación ingenieril. Observe que esta expresión no es válida después del inicio del rebajo.
- 6-30** Se recolectó la siguiente información a partir de un espécimen de prueba estándar de latón laminado en frío y recocido. El espécimen tenía una longitud inicial calibrada l_0 de 35 mm y un área inicial de la sección transversal A_0 de 10.5 mm^2 .

Carga (N)	Δl (mm)
0	0.0000
66	0.0112
177	0.0157
327	0.0199
462	0.0240
797	1.72
1 350	5.55
1 720	8.15
2 220	13.07
2 690	22.77 (carga máxima)
2 410	25.25 (fractura)

- Grafique la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles y la curva de esfuerzo-deformación verdaderos. Dado que el área de la sección transversal instantánea del espécimen se desconoce después del punto de rebajo, trunque la información de esfuerzo verdadero-deformación verdadera en el punto que corresponde a la resistencia a la tensión máxima. Se recomienda el uso de un paquete de un software graficador.
- Comente sobre los valores relativos de esfuerzo-deformación verdaderos y de esfuerzo-deformación ingenieriles durante la carga elástica y antes del rebajo.
- Si la información de esfuerzo-deformación verdaderos se conociera después del punto de rebajo, ¿cómo podría ser la curva?
- Calcule la resistencia a la fluencia compensada al 0.2%.

- e) Calcule la resistencia a la tensión.
f) Calcule el módulo elástico utilizando un ajuste lineal para la información apropiada.

6-31 Se recolectó la siguiente información a partir de un espécimen de prueba estándar de una aleación de cobre de 0.505 pulg de diámetro (longitud inicial (l_0) = 2.0 pulg):

Carga (lb)	Δl (pulg)
0	0.0000
3 000	0.00167
6 000	0.00333
7 500	0.00417
9 000	0.0090
10 500	0.040
12 000	0.26
12 400	0.50 (carga máxima)
11 400	1.02 (fractura)

Después de la fractura la longitud total fue de 3.014 pulg y el diámetro fue de 0.374 pulg. Grafique la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles y calcule

- a) la resistencia a la fluencia compensada al 0.2%;
b) la resistencia a la tensión;
c) el módulo de elasticidad;
d) el % de elongación;
e) el % de reducción en el área;
f) el esfuerzo ingenieril en la fractura, y
g) el módulo de resiliencia.

6-32 Se recolectó la siguiente información a partir de un espécimen de prueba de cloruro de polivinilo de 0.4 pulg de diámetro (l_0 = 2.0 pulg):

Carga (lb)	Δl (pulg)
0	0.00000
300	0.00746
600	0.01496
900	0.02374
1 200	0.032
1 500	0.046
1 660	0.070 (carga máxima)
1 600	0.094
1 420	0.12 (fractura)

Después de la fractura la longitud total fue de 2.09 pulg y el diámetro fue de 0.393 pulg. Grafique la curva de esfuerzo-deformación ingenieril y calcule

- a) la resistencia a la fluencia compensada al 0.2%;
b) la resistencia a la tensión;
c) el módulo de elasticidad;
d) el % de elongación;
e) el % de reducción en el área;
f) el esfuerzo ingenieril en la fractura, y
g) el módulo de resiliencia.

6-33 Se recolectó la siguiente información a partir de un espécimen de prueba de magnesio de 12 mm de diámetro (l_0 = 30.00 mm):

Carga (N)	Δl (mm)
0	0.0000
5 000	0.0296
10 000	0.0592
15 000	0.0888
20 000	0.15
25 000	0.51
26 500	0.90
27 000	1.50 (carga máxima)
26 500	2.10
25 000	2.79 (fractura)

Después de la fractura la longitud total fue de 32.61 mm y el diámetro fue de 11.74 mm. Grafique la curva de esfuerzo-deformación ingenieril y calcule

- a) la resistencia a la fluencia compensada al 0.2%;
b) la resistencia a la tensión;
c) el módulo de elasticidad;
d) el % de elongación;
e) el % de reducción en el área;
f) el esfuerzo ingenieril en la fractura, y
g) el módulo de resiliencia.

6-34 Se recolectó la siguiente información a partir de un espécimen de prueba de un hierro colado dúctil de 20 mm de diámetro (l_0 = 40.00 mm):

Carga (N)	Δl (mm)
0	0.0000
25 000	0.0185
50 000	0.0370
75 000	0.0555
90 000	0.20
105 000	0.60
120 000	1.56
131 000	4.00 (carga máxima)
125 000	7.52 (fractura)

Después de la fractura la longitud total fue de 47.42 mm y el diámetro fue de 18.35 mm. Grafique la curva de esfuerzo-deformación

ingenieriles y la curva esfuerzo-deformación verdaderos. Dado que el área de la sección transversal instantánea del espécimen se desconoce después del punto de rebajo, trunque la información de esfuerzo verdadero-deformación verdadera en el punto que corresponde a la resistencia a la tensión máxima. Se recomienda el uso de un paquete de software graficador. Calcule

- la resistencia a la fluencia compensada al 0.2%;
- la resistencia a la tensión;
- el módulo de elasticidad, utilizando una ajuste lineal a la información apropiada;
- el % de elongación;
- el % de reducción en el área;
- el esfuerzo ingenieril en la fractura, y
- el módulo de resiliencia.

- 6-35** a) Una barra de titanio de 0.4 pulg de diámetro y 12 pulg de largo tiene una resistencia a la fluencia de 50 000 psi, un módulo de elasticidad de 16×10^6 psi y una razón de Poisson de 0.30. Determine la longitud y el diámetro de la barra cuando se aplica una carga de 500 lb.
- b) Cuando se aplica una carga de tensión a una barra de cobre de 1.5 cm de diámetro, el diámetro se reduce a 1.498 cm. Determine la carga aplicada, utilizando la información en la tabla 6-3.

- 6-36** Considere los diagramas de esfuerzo-deformación de tensión en la figura 6-30 etiquetados 1 y 2. Estos diagramas son comunes de los metales. Responda las siguientes preguntas y considere cada inciso como una pregunta separada que no tiene relación con los incisos anteriores a la pregunta.

- Las muestras 1 y 2 son idénticas a excepción del tamaño de los granos. ¿Cuál muestra tiene los granos más pequeños? ¿Cómo lo sabe?
- Las muestras 1 y 2 son idénticas a excepción de que se probaron a temperaturas diferentes. ¿Cuál fue probada a una temperatura menor? ¿Cómo lo sabe?

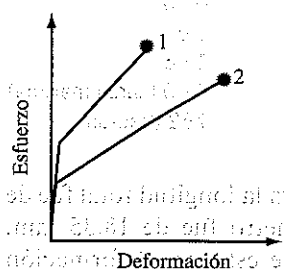


Figura 6-30 Curvas de esfuerzo-deformación para el problema 6-36.

- Las muestras 1 y 2 son materiales diferentes. ¿Cuál es la más tenaz? Explique.
- Las muestras 1 y 2 son idénticas a excepción de que una de ellas es un metal puro y la otra tiene un porcentaje menor de adición de aleación. ¿Cuál muestra ha sido aleada? ¿Cómo lo sabe?
- Dadas las curvas de esfuerzo-deformación para los materiales 1 y 2, ¿cuál material tiene el menor valor de dureza en la escala de dureza de Brinell? ¿Cómo lo sabe?
- ¿Las curvas de esfuerzo-deformación mostradas son curvas de esfuerzo-deformación verdaderos o de esfuerzo-deformación ingenieriles? ¿Cómo lo sabe?
- ¿Cuál de los dos materiales representados por las muestras 1 y 2 exhibiría una resistencia a la fluencia cortante mayor? ¿Cómo lo sabe?

Sección 6-6 Prueba de flexión para materiales quebradizos

- 6-37** Defina el término “resistencia a la flexión” y “módulo de flexión”.

- 6-38** ¿Por qué con frecuencia se conduce una prueba de flexión sobre los materiales quebradizos?

- 6-39** Una barra de Al_2O_3 que es de 0.25 pulg de grosor, 0.5 pulg de ancho y 9 pulg de largo se prueba en un aparato de flexión en tres puntos con los soportes localizados a 6 pulg. La deflexión del centro de la barra se mide como una función de la carga aplicada. La información se muestra abajo. Determine la resistencia a la flexión y el módulo de flexión.

Fuerza (lb)	Deflexión (pulg)
14.5	0.0025
28.9	0.0050
43.4	0.0075
57.9	0.0100
86.0	0.0149 (fractura)

- 6-40** Se lleva a cabo una prueba de flexión en tres puntos sobre un bloque de ZrO_2 que es de 8 pulg de largo, 0.50 pulg de ancho y 0.25 pulg de grueso y que está sobre dos soportes a 4 pulg. Cuando se aplica una fuerza de 400 lb, el espécimen se flexiona 0.037 pulg y se rompe. Calcule

- la resistencia a la flexión y
- el módulo de flexión, suponiendo que no ocurre ninguna deformación plástica.

- 6-41** Se desarrolla una prueba de flexión en tres puntos sobre un bloque de carburo de silicio que es de 10 cm de largo, 1.5 cm de ancho y 0.6 cm de grueso y que está sobre dos soportes a 7.5 cm. La muestra se rompe cuando se registra una deflexión de 0.09 mm. El módulo de flexión para el carburo de silicio es de 480 GPa. Suponga que no ocurre ninguna deformación plástica. Calcule
- la fuerza que ocasiona la fractura y
 - la resistencia a la flexión.
- 6-42** a) Se requiere que un polímero termoplástico que contiene cuentas de vidrio se flexione 0.5 mm cuando se le aplica una fuerza de 500 N. La parte de polímero es de 2 cm de ancho, 0.5 cm de grosor y 10 cm de largo. Si el módulo de flexión es de 6.9 GPa, determine la distancia mínima entre los soportes. ¿El polímero se fracturará si su resistencia a la flexión es de 85 MPa? Suponga que no ocurre ninguna deformación plástica.
- b) El módulo de flexión de la alúmina es de 45×10^6 psi y su resistencia a la flexión es de 46 000 psi. Una barra de alúmina de 0.3 pulg de grosor, 1.0 pulg de ancho y 10 pulg de largo se coloca sobre soportes a 7 pulg. Determine la cantidad de flexión en el momento en que la barra se rompe, suponiendo que no ocurre ninguna deformación plástica.
- 6-43** Las cerámicas son mucho más resistentes en compresión que en tensión. Explique por qué.
- 6-44** Las dislocaciones tienen un efecto importante sobre la deformación plástica de los metales, pero no desempeñan una función importante en el comportamiento mecánico de las cerámicas. ¿Por qué?
- 6-45** ¿Qué controla la resistencia de las cerámicas y los vidrios?

Sección 6-7 Dureza de los materiales y sección 6-8 Nanoindentación

- 6-46** ¿A qué se refiere con el término “dureza de un material”?
- 6-47** ¿Por qué la información de la dureza es difícil de correlacionar con las propiedades mecánicas de los materiales de una manera cuantitativa?
- 6-48** ¿Cuál es el material más duro (natural o sintético)? ¿Lo es el diamante?
- 6-49** Explique los términos “macro dureza” y “micro dureza”.
- 6-50** Una medición de la dureza de Brinell, utilizando un penetrador de 10 mm de diámetro y

una carga de 500 kg, produce una indentación de 4.5 mm sobre una placa de aluminio. Determine el número de dureza de Brinell (DB) del metal.

- 6-51** Cuando se aplica una carga de 3 000 kg a una esfera de 10 mm de diámetro en una prueba de Brinell de un acero, se produce una indentación de 3.1 mm. Calcule la resistencia a la tensión del acero.
- 6-52** ¿Por qué es necesario desarrollar calibraciones en un patrón antes de llevar a cabo un experimento de nanoindentación?
- 6-53** El módulo elástico de un vidrio metálico se determina de 95 GPa utilizando una prueba de nanoindentación con una punta de Berkovich de diamante. La razón de Poisson del vidrio metálico es de 0.36. La rigidez de descarga se determina a partir de la información del desplazamiento de la carga como de 5.4×10^5 N/m. La carga máxima es de 120 mN. ¿Cuál es la dureza del vidrio metálico a esta profundidad de indentación?

Sección 6-9 Efectos de la rapidez de deformación y comportamiento al impacto y sección 6-10 Propiedades obtenidas a partir de la prueba de impacto

- 6-54** La siguiente información se obtuvo a partir de una serie de pruebas de impacto de Charpy llevadas a cabo sobre cuatro aceros, cada uno teniendo un contenido distinto de manganeso. Grafique la información y determine
- la temperatura de transición de cada uno (definida por la media de las energías absorbidas en las regiones dúctil y quebradiza) y
 - la temperatura de transición de cada uno (definida como la temperatura que provee 50 J de energía absorbida).

Temperatura de la prueba (°C)	Energía de impacto (J)			
	0.30% Mn	0.39% Mn	1.01% Mn	1.55% Mn
-100	2	5	5	15
-75	2	5	7	25
-50	2	12	20	45
-25	10	25	40	70
0	30	55	75	110
25	60	100	110	135
50	105	125	130	140
75	130	135	135	140
100	130	135	135	140

- 6-55** Grafique la temperatura de transición en función del contenido de manganeso utilizando la

información en el problema 6-54 y explique el efecto del manganeso sobre la tenacidad del acero. ¿Cuál es el manganeso mínimo permisible en el acero si se va a utilizar una parte a 0 °C?

6-56 La siguiente información se obtuvo a partir de una serie de pruebas de impacto de Charpy llevadas a cabo sobre cuatro hierros colados dúctiles, cada uno con un contenido distinto de silicio. Grafique la información y determine

- la temperatura de transición de cada uno (definida por la media de las energías absorbidas en las regiones dúctil y quebradiza) y
- la temperatura de transición de cada uno (definida como la temperatura que provee 10 J de energía absorbida).

Grafique la temperatura de transición en función del contenido de silicio y explique el efecto del silicio sobre la tenacidad del hierro colado. ¿Cuál es el contenido silicio máximo permisible en el hierro fundido si se va a utilizar una parte a 25 °C?

Temperatura de la prueba (°C)	Energía de impacto (J)			
	2.55% Si	2.85% Si	3.25% Si	3.63% Si
-50	2.5	2.5	2	2
-5	3	2.5	2	2
0	6	5	3	2.5
25	13	10	7	4
50	17	14	12	8
75	19	16	16	13
100	19	16	16	16
125	19	16	16	16

6-57 Con frecuencia se recomiendan metales CCCa para su uso a temperaturas bajas, en particular cuando se espera alguna carga repentina de la parte. Explique por qué.

6-58 Una parte de acero puede fabricarse por medio de metalurgia de polvos (compactando las partículas de polvo de hierro y sinterizándolas para producir un sólido) o por medio de su maquinado a partir de un bloque de acero sólido. ¿Cuál parte se esperaría que tuviera la mayor tenacidad? Explique.

6-59 ¿A qué se refiere con el término sensibilidad a la muesca?

6-60 ¿Cuál es la diferencia entre una prueba de tensión y una prueba de impacto? Utilizando esta información, explique por qué los valores de la tenacidad medidos utilizando pruebas de im-

pacto no siempre se pueden correlacionar con la tenacidad a la tensión medida utilizando pruebas de tensión.

6-61 Varias aleaciones de aluminio-silicio tienen una estructura que incluye placas con bordes agudos de silicio quebradizo en la matriz de aluminio blanda y más dúctil. ¿Esperaría que estas aleaciones fueran sensibles a la muesca en una prueba de impacto? ¿Esperaría que estas aleaciones tuvieran buena tenacidad? Explique sus respuestas.

6-62 ¿Qué es la temperatura de transición de dúctil a quebradizo (TTDQ)?

6-63 Cómo se define la tenacidad a la tensión en relación con el diagrama de esfuerzo-deformación verdaderos? ¿Cómo se relaciona la tenacidad a la tensión con la tenacidad de impacto?

6-11 Vidrios metálicos voluminosos y su comportamiento mecánico

6-64 En la figura 6-31 se muestra un diagrama de la carga en función del desplazamiento para un vidrio metálico. Un vidrio metálico es un metal no cristalino (amorfo). La muestra se probó en compresión. *Por tanto, aun cuando los valores de la carga y el desplazamiento se grafican como positivos, la longitud de la muestra se acortó durante la prueba.* La muestra tenía una longitud en la dirección de la carga de 6 mm y un área de la sección transversal de 4 mm². Los valores para la carga y el desplazamiento se dan en los puntos marcados con un círculo y una X. El primer punto de información es (0, 0). La falla de la muestra se indica con una X. Responda las siguientes preguntas.

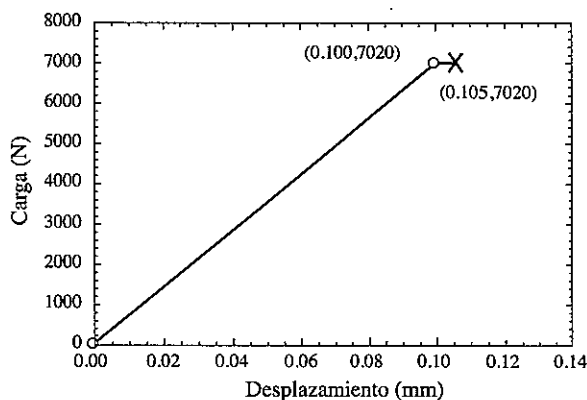


Figura 6-31 Carga en función del desplazamiento para un vidrio metálico probado en compresión para el problema 6-64.

- a) Calcule el módulo elástico.
- b) ¿Cómo se comparan el módulo elástico con el módulo de acero?
- c) Calcule el esfuerzo ingenieril en el límite proporcional.
- d) Considere su respuesta al inciso c) como la resistencia a la fluencia del material. ¿Es ésta un límite elástico alto o un límite elástico bajo? Soporte su respuesta con una orden de comparación de magnitud con un metal policristalino común.
- e) Calcule la deformación verdadera en el límite proporcional. Recuerde que la longitud de la muestra disminuye en compresión.
- f) Calcule la deformación verdadera total a la falla.
- g) Calcule el trabajo de la fractura para este vidrio metálico con base en el esfuerzo y la deformación ingenieriles.

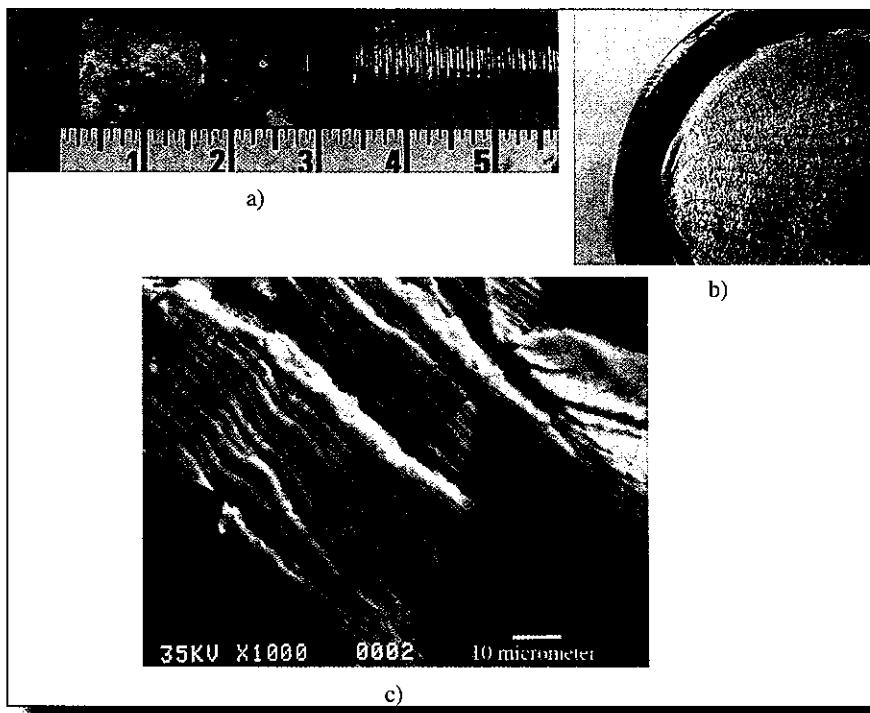
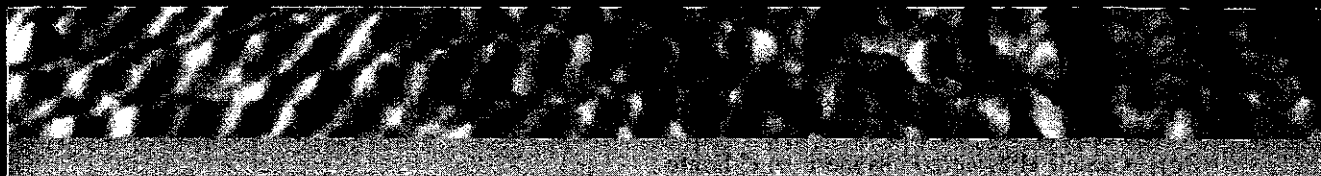
6-12 Comportamiento mecánico a escalas de longitud pequeñas

6-65 Nombre una aplicación específica para la que puede ser importante la comprensión del com-

portamiento mecánico dependiente del tamaño en el diseño del proceso.

Knovel® Problemas

- K6-1** Una barra recocida de 120 pulg con un área de sección transversal de 0.86 pulg^2 fue extruida de una aleación de aluminio 5083-O y se cargó de manera axial. Bajo la carga, la longitud de la barra se incrementó a 120.15 pulg. No ocurrió deformación plástica.
- a) Encuentre el módulo de elasticidad del material y calcule su esfuerzo de tensión permisible, suponiendo que es de 50% del esfuerzo de fluencia a la tensión.
 - b) Calcule el esfuerzo de tensión y la carga axial aplicada a la barra.
 - c) Compare el esfuerzo de tensión calculado con el esfuerzo de tensión permisible y encuentre el valor absoluto de la elongación de la barra para el esfuerzo permisible.



Las fallas de los pernos de acero inoxidable 316 mostradas aquí se deben a la fatiga mecánica. En este caso, los pernos se rompen en el radio de la cabeza a la espiga (véase la figura a)). Una fractografía óptica de una de las superficies de fractura (véase la figura b)) muestra que la fractura inicia en una localización y se propaga a través del perno hasta que ocurre la falla final. Las marcas de playa y las estrías (véase la figura c)), comunes de la fatiga, están presentes en todas las superficies de fractura. La falla por fatiga de sujetadores roscados es con frecuencia la más asociada con el apretado insuficiente del sujetador, lo que resulta en la flexión y en la fractura subsecuente. (Imágenes cortesía de Corrosion Testing Laboratories, Bradley Kraritz, Richard Corbett, Albert Olszewski y Robert R. Odle.)

Propiedades mecánicas: segunda parte

¿Se ha preguntado alguna vez?

- ¿Por qué las fibras de vidrio de distintas longitudes tienen resistencias diferentes?
- ¿Puede un material o componente fracturarse con el paso del tiempo aun si el esfuerzo total no excede la resistencia a la fluencia?
- ¿Por qué los aviones tienen una vida útil finita?
- ¿Por qué a la larga fallan los materiales?

Un objetivo de este capítulo es introducir los conceptos básicos asociados con la tenacidad a la fractura de los materiales. En este sentido, se examinarán qué factores afectan la resistencia de los vidrios y cerámicas y cómo la distribución de Weibull describe de manera cuantitativa la variabilidad en su resistencia. Otro objetivo es aprender acerca de los fenómenos dependientes del tiempo como la fatiga, la termofluencia y la corrosión bajo esfuerzo. Este capítulo revisará algunos de los procedimientos de prueba básicos que utilizan los ingenieros para evaluar muchas de estas propiedades y la falla de los materiales.

7-1 Mecánica de la fractura

La **mecánica de la fractura** es la disciplina que trata con el comportamiento de los materiales que contienen grietas u otras imperfecciones menores. El término “imperfección” se refiere a las características como poros (orificios) pequeños, inclusiones o microgrietas. El término “imperfección” *no* se refiere a los defectos al nivel atómico como las vacancias o dislocaciones. Lo que se desea conocer es el esfuerzo máximo que puede soportar un material si contiene imperfecciones de cierto tamaño y geometría. La **tenacidad a la fractura** mide la habilidad de un material que contiene una imperfección para soportar una carga aplicada. Observe que ésta *no* requiere una rapidez de deformación alta (impacto).

Puede llevarse a cabo una prueba común de tenacidad a la fractura aplicando un esfuerzo de tensión a un espécimen preparado con una imperfección de tamaño y geometría conocidos (figura 7-1). El esfuerzo aplicado al material se intensifica en la imperfección, la cual actúa como un *elevador de esfuerzo*. Para un caso sencillo, el *factor de intensidad del esfuerzo* K es

$$K = f\sigma\sqrt{\pi a} \quad (7-1)$$

donde f es un factor geométrico para el espécimen y la imperfección, σ es el esfuerzo aplicado y a es el tamaño de la imperfección [como se define en la figura 7-1]. Si se supone que el espécimen tiene un ancho “infinito”, $f \cong 1.0$. Para una muesca de borde sencillo [figura 7-1a)], $f = 1.12$.

Al llevar a cabo una prueba sobre un espécimen con un tamaño de imperfección conocido, se puede determinar el valor de K que ocasiona que la fisura crezca y ocasiona la falla. Este factor de intensidad del esfuerzo crítico se define como la **tenacidad a la fractura**, K_{Ic} :

$$K_{Ic} = K \text{ requerido para que una grieta se propague} \quad (7-2)$$

La tenacidad a la fractura depende del grosor de la muestra: a medida que el grosor aumenta, la tenacidad a la fractura K_{Ic} disminuye a un valor constante (figura 7-2). A esta constante se le llama **tenacidad a la fractura en estado de deformación plana**, K_{Ic} . Es esta K_{Ic} la que por lo regular se reporta como la propiedad de un material. El valor de K_{Ic} no depende del grosor de la muestra. La tabla 7-1 compara el valor de K_{Ic} con la resistencia a la fluencia de varios materiales. Las unidades para la tenacidad a la fractura son ksi $\sqrt{\text{pulg}} = 1.0989 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$.

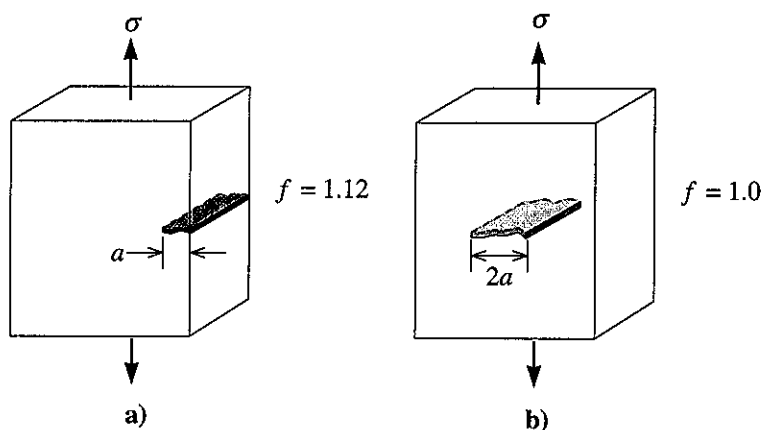


Figura 7-1 Representación esquemática de la tenacidad a la fractura de especímenes con imperfecciones a) en el borde y b) internas. El tamaño de la imperfección se define de manera diferente para las dos clases.

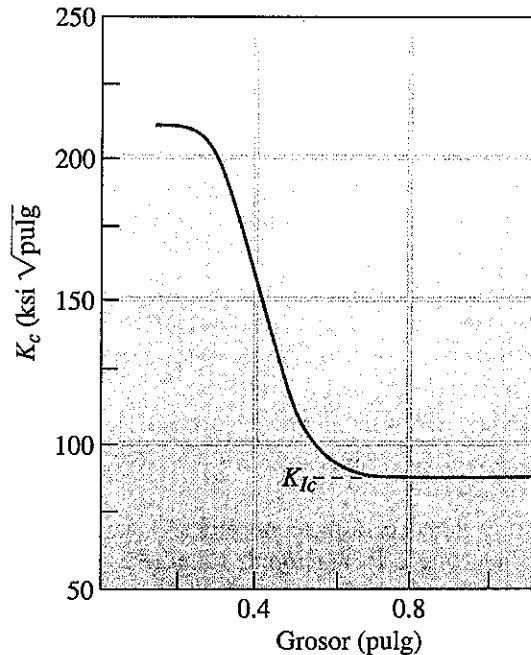


Figura 7-2

La tenacidad a la fractura K_c de un acero con una resistencia a la fluencia de 300 000 psi disminuye con el aumento de grosor, con el tiempo se estabiliza la tenacidad a la fractura en el estado de deformación plana K_{Ic} .

La habilidad de un material para resistir el crecimiento de una grieta depende de un gran número de factores:

1. Las imperfecciones más grandes reducen el esfuerzo permitido. Las técnicas de fabricación especiales, como el filtrado de impurezas de metales líquidos y el prensado en caliente o prensado isostático en caliente de partículas en polvo para producir componentes cerámicos o superaleaciones reducen el tamaño de las imperfecciones y mejoran la tenacidad a la fractura (capítulos 9 y 15).
2. La habilidad de un material para deformarse es crítica. En los metales dúctiles el material cercano a la punta de la imperfección puede deformarse, ocasionando que la punta de cualquier grieta se redondee, reduciendo el factor de intensidad del esfuerzo y previniendo el crecimiento de la grieta. El incremento de la resistencia de un metal dado por lo regular disminuye la ductilidad y da una tenacidad a la fractura menor.

TABLA 7-1 ■ Tenacidad a la fractura en estado de deformación plana K_{Ic} de materiales seleccionados

Material	Tenacidad a la fractura K_{Ic} (psi $\sqrt{\text{pulg}}$)	Resistencia a la fluencia o resistencia última (para sólidos quebradizos) (psi)
Aleación de Al-Cu	22 000	66 000
	33 000	47 000
Ti-6% Al-4% V	50 000	130 000
	90 000	125 000
Acero al Ni-Cr	45 800	238 000
	80 000	206 000
Al ₂ O ₃	1 600	30 000
Si ₃ N ₄	4 500	80 000
ZrO ₂ fortalecida por transformación	10 000	60 000
Compuesto de Si ₃ N ₄ -SiC	51 000	120 000
Polímero de metacrilato de polimetilo	900	4 000
Polímero de policarbonato	3 000	8 400

(Véase la tabla 7-1.) Los materiales quebradizos como las cerámicas y muchos polímeros tienen tenacidades a la fractura mucho menores que los metales.

3. Las piezas más rígidas y gruesas de un material dado tienen una tenacidad a la fractura menor que los materiales delgados.
4. El incremento de la rapidez de la aplicación de la carga, como en una prueba de impacto, por lo regular reduce la tenacidad a la fractura del material.
5. El aumento de la temperatura por lo regular incrementa la tenacidad a la fractura, tal como en la prueba de impacto.
6. Un tamaño del grano pequeño por lo regular mejora la tenacidad a la fractura, mientras que más defectos puntuales y dislocaciones reducen la tenacidad a la fractura. Por tanto, un material cerámico de grano fino puede proveer una resistencia mejorada al crecimiento de grietas.
7. En ciertos materiales cerámicos se pueden aprovechar las transformaciones inducidas por el esfuerzo que conducen a esfuerzos de compresión que ocasionan un aumento en la tenacidad a la fractura.

La prueba de fractura de las cerámicas no puede llevarse a cabo con facilidad utilizando una muesca aguda, dado que la formación de tal muesca con frecuencia ocasiona que las muestras se rompan. Se puede utilizar la prueba de dureza para obtener una medida de la tenacidad a la fractura de muchas cerámicas. Cuando un material cerámico se indenta, los esfuerzos de tensión generan grietas secundarias que se forman en la indentación y la longitud de las grietas secundarias proveen una medida de la tenacidad del material cerámico. En algunos casos se emplea una indentación creada utilizando un probador de dureza como una grieta inicial para la prueba de flexión. En general, este método de medición directa de las grietas es más adecuado por comparación, en lugar de las mediciones absolutas de los valores de las tenacidades a la fractura. En la figura 7-3 se muestran la tenacidad a la fractura y la resistencia a la fractura de varios materiales de ingeniería.

7-2

Importancia de la mecánica de la fractura

El método de la mecánica de la fractura permite diseñar y seleccionar materiales mientras se toma en cuenta la presencia inevitable de imperfecciones. Existen tres variables a considerar: la propiedad del material (K_c o K_{Ic}), el esfuerzo σ que el material debe soportar y el tamaño de la imperfección a . Si se conocen dos de estas variables, se puede determinar la tercera.

Selección de un material Si se conoce el tamaño máximo a de las imperfecciones en el material y la magnitud del esfuerzo aplicado, se puede seleccionar un material que tenga una tenacidad a la fractura K_c o K_{Ic} lo suficientemente grande para prevenir el crecimiento de las imperfecciones.

Diseño de un componente Si se conoce el tamaño máximo de cualquier imperfección y el material (por tanto su K_c o K_{Ic} ya ha sido seleccionada), se puede calcular el esfuerzo máximo que el componente puede soportar. Entonces se puede dimensionar la parte de manera apropiada para asegurar que no se exceda el esfuerzo máximo.

Diseño de un método de fabricación o de prueba Si el material ha sido seleccionado, se conoce el esfuerzo aplicado y el tamaño del componente está fijado, se puede calcular el tamaño máximo de una imperfección que puede tolerarse. Una técnica de prueba no destructiva que detecte cualquier imperfección mayor que este tamaño crítico puede ayudar a asegurar que la parte funcionará de manera segura. Además, se encuentra que, seleccionando el proceso de fabricación correcto se pueden producir imperfecciones que sean menores que este tamaño crítico.

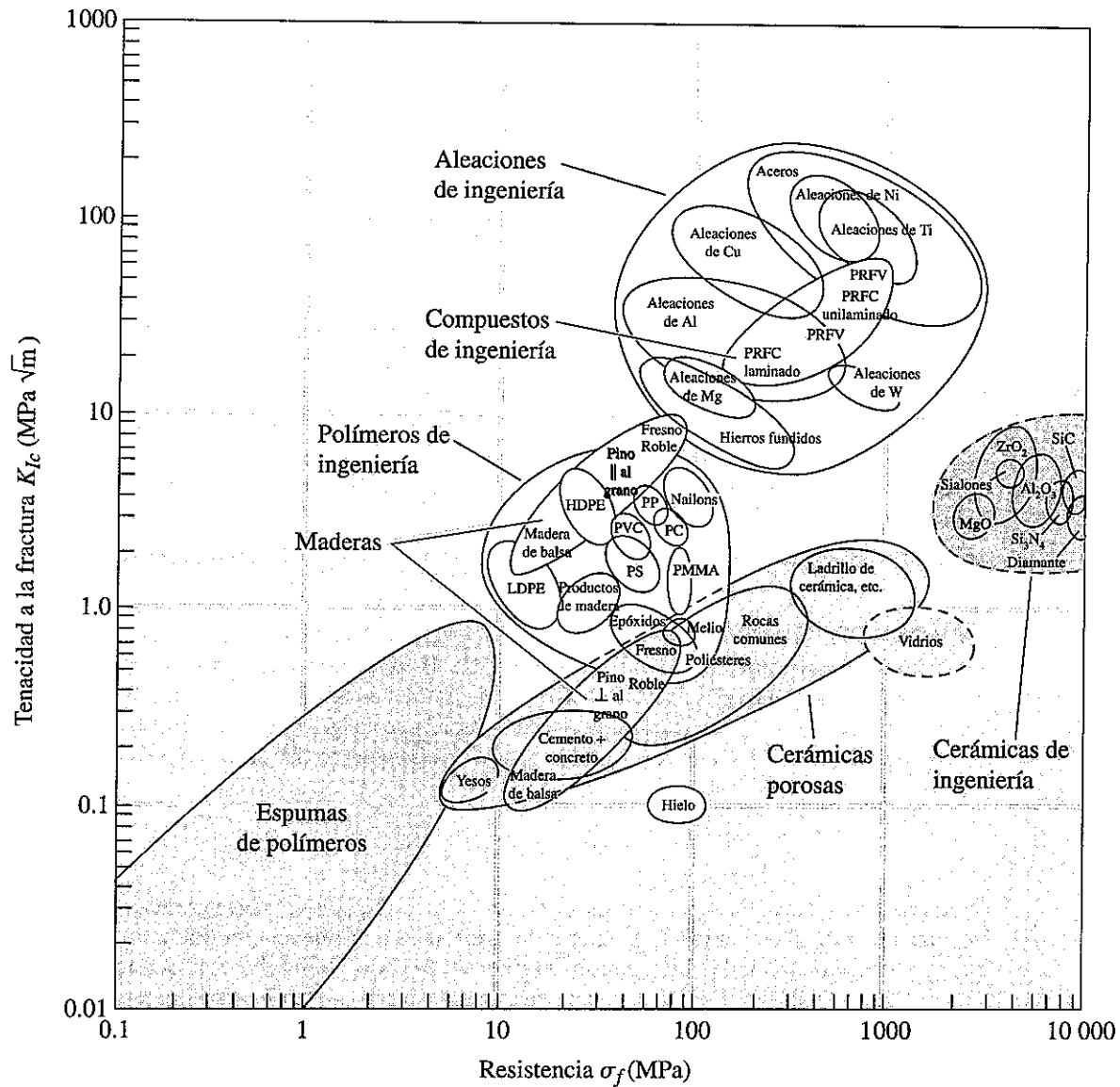


Figura 7-3 Tenacidad a la fractura en función de la resistencia de distintos materiales de ingeniería. (Fuente: Adaptada de Mechanical Behavior of Materials, por T. H. Courtney, 2000, p. 434, fig. 9-18. Copyright © 2000 McGraw-Hill Companies. Adaptada con permiso.)

Ejemplo 7-1

Diseño de una prueba no destructiva

Una placa de acero grande utilizada en un reactor nuclear tiene una tenacidad a la fractura en estado de deformación plana de $\sqrt{pulg}$ y es expuesta a un esfuerzo de 45 000 psi durante el servicio. Diseñe un procedimiento de prueba o inspección capaz de detectar una grieta en el borde de la placa antes de que sea probable que la grieta crezca a una rapidez (velocidad) catastrófica.

SOLUCIÓN

Se necesita determinar el tamaño mínimo de una grieta que se propagará en el acero en estas condiciones. A partir de la ecuación 7-1, suponiendo que $f = 1.12$ para una grieta de muesca de un borde:

$$K_{Ic} = f\sigma\sqrt{\pi a}$$

$$80\,000 = (1.12)(45\,000)\sqrt{\pi a}$$

$$a = 0.8 \text{ pulg}$$

Una grieta de 0.8 pulg de profundidad en el borde sería relativamente fácil de detectar. Con frecuencia, las grietas de este tamaño pueden observarse a simple vista. Una variedad de otras pruebas, tales como la inspección con un tinte penetrante, la inspección por partículas magnéticas y la inspección por corrientes parásitas también detectan grietas mucho menores que ésta. Si la rapidez de crecimiento de una grieta es lenta y la inspección se hace con regularidad, debe descubrirse una grieta mucho antes de que alcance este tamaño crítico.

Fractura quebradiza Cualquier grieta o imperfección limita la habilidad de una cerámica para soportar un esfuerzo de tensión. Esto se debe a que una grieta (en algunas ocasiones llamada **imperfección de Griffith**) concentra y magnifica el esfuerzo aplicado. La figura 7-4 muestra una grieta de longitud a en la superficie de un material quebradizo. También se muestra el radio r de la grieta. Cuando se aplica un esfuerzo de tensión σ , el esfuerzo real en la punta de la grieta es:

$$\sigma_{\text{real}} \cong 2\sigma\sqrt{a/r} \quad (7-3)$$

Para grietas muy delgadas (r) o grietas largas (a), la razón $\sigma_{\text{real}}/\sigma$ se vuelve grande o el esfuerzo se intensifica. Si el esfuerzo (σ_{real}) excede la resistencia a la fluencia, la grieta crece y con el tiempo ocasiona una falla, aun cuando el esfuerzo aplicado nominal σ es pequeño.

En un método distinto se reconoce que un esfuerzo aplicado ocasiona una deformación elástica, relacionada con el módulo de elasticidad E del material. Cuando una grieta se

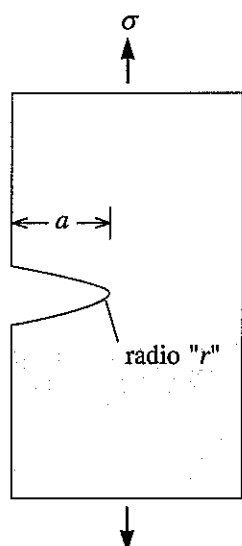


Figura 7-4
Diagrama esquemático de una imperfección de Griffith en una cerámica.

propaga, esta energía de deformación se libera, reduciendo la energía total. Sin embargo, al mismo tiempo se crean dos nuevas superficies por la extensión de la grieta; esto incrementa la energía asociada con la superficie. Al balancear la energía de deformación y la energía en la superficie, se encuentra que el esfuerzo crítico requerido para propagar la grieta está dado por la ecuación de Griffith,

$$\sigma_{\text{crítico}} \cong \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} \quad (7-4)$$

donde a es la longitud de una grieta en la superficie (o la mitad de la longitud de una grieta interna) y γ es la energía en la superficie por unidad de área. De nuevo, esta ecuación muestra que incluso las fisuras pequeñas limitan severamente la resistencia de la cerámica.

También observe que si se reacomoda la ecuación 7-1, la cual describe el factor de intensidad del esfuerzo K , se obtiene:

$$\sigma = \frac{K}{f\sqrt{\pi a}} \quad (7-5)$$

Esta ecuación es similar en forma a la ecuación 7-4. Cada una de estas ecuaciones indica la dependencia de las propiedades mecánicas con el tamaño de las fisuras presentes en la cerámica. El desarrollo de procesos de fabricación (véase el capítulo 15) para minimizar el tamaño de las fisuras se vuelve crucial en la mejora de la resistencia de las cerámicas.

Las fisuras son de importancia principal cuando esfuerzos de tensión actúan sobre el material. Los esfuerzos de compresión cierran en vez de abrir una grieta; en consecuencia, las cerámicas con frecuencia tienen resistencias a la compresión muy buenas.

Ejemplo 7-2

Propiedades de las cerámicas de SiAlON

Suponga que una cerámica avanzada sialon (acrónimo para SiAlON u oxinitruro de silicio y aluminio, por sus siglas en inglés), posee una resistencia a la tensión de 60 000 psi. Suponga que este valor es para una cerámica sin imperfecciones. (En la práctica, es casi imposible producir cerámicas sin imperfecciones.) Se observa una grieta de 0.01 pulg de profundidad antes de que se pruebe una parte de sialon. La parte falla de manera inesperada a un esfuerzo de 500 psi por la propagación de la grieta. Calcule el radio de la punta de la grieta.

SOLUCIÓN

La falla que ocurrió debido al esfuerzo aplicado de 500 psi, magnificada por la concentración del esfuerzo en la punta de la grieta, produjo un esfuerzo real igual a la resistencia a la tensión última. A partir de la ecuación 7-3,

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{real}} &= 2\sigma\sqrt{a/r} \\ 60\,000 \text{ psi} &= (2)(500 \text{ psi})\sqrt{0.01 \text{ pulg}/r} \\ \sqrt{0.01/r} &= 60 \quad \text{o} \quad 0.01/r = 3600 \\ r &= 2.8 \times 10^{-6} \text{ pulg} = 7.1 \times 10^{-6} \text{ cm} = 710 \text{ \AA} \end{aligned}$$

La probabilidad de que sea capaz de medir un radio de curvatura de este tamaño por medio de cualquier método de prueba no destructiva es virtualmente de cero. Por tanto, aunque la ecuación 7-3 puede ayudar a ilustrar los factores que influyen en cómo se propaga una grieta en un material quebradizo, no ayuda a predecir la resistencia de las partes cerámicas reales.

Ejemplo 7-3**Diseño de un soporte cerámico**

Determine el grosor mínimo permisible para una placa de 3 pulg de ancho hecha de sialon, el cual posee una tenacidad a la fractura de 9000 psi $\sqrt{\text{pulg}}$. La placa deberá soportar una carga de tensión de 40 000 lb. La parte se va a probar de manera no destructiva para asegurar que no se presenten imperfecciones que podrían ocasionar la falla. El grosor mínimo permisible de la parte dependerá del tamaño mínimo de las imperfecciones que puede determinarse por medio de la técnica de prueba disponible. Suponga que se tienen tres métodos de prueba no destructivos disponibles. La radiografía de rayos X puede detectar imperfecciones mayores a 0.02 pulg, la radiografía de rayos gamma puede detectar imperfecciones mayores a 0.008 pulg y la inspección ultrasónica puede detectar imperfecciones mayores a 0.005 pulg. Suponga un factor geométrico $f = 1.0$ para todas las fisuras.

SOLUCIÓN

Para estos tamaños de imperfecciones, se debe calcular ahora el grosor mínimo de la placa que asegurará que estos tamaños de las imperfecciones no se propagarán. A partir de la ecuación 7-5:

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a}} = \frac{F}{A_{\text{mín}}}$$

$$A_{\text{mín}} = \frac{F\sqrt{\pi a}}{K_{Ic}} = \frac{(40\,000)(\sqrt{\pi})(\sqrt{a})}{9000}$$

$$A_{\text{mín}} = 7.88\sqrt{a} \text{ pulg}^2 \text{ y grosor} = (7.88 \text{ pulg}^2/3 \text{ pulg})\sqrt{a} = 2.63\sqrt{a}$$

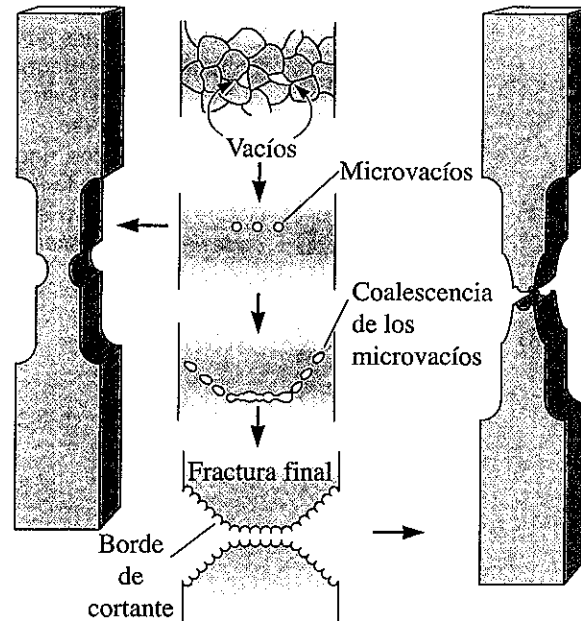
Método de prueba no destructiva	Grieta detectable más pequeña (pulg)	Área mínima (pulg ²)	Grosor mínimo (pulg)	Esfuerzo máximo (psi)
Radiografía de rayos X	0.020	1.11	0.37	36 000
Radiografía de rayos γ	0.008	0.70	0.23	57 000
Inspección ultrasónica	0.005	0.56	0.19	71 000

La habilidad para detectar las imperfecciones, acoplada con la habilidad para producir una cerámica con imperfecciones menores al límite de detección, afecta de manera significativa el esfuerzo máximo que puede tolerarse y, por tanto, el tamaño de la parte. En este ejemplo, la parte puede ser más pequeña si se dispone de la inspección ultrasónica.

La tenacidad a la fractura también es importante. Si se hubiese utilizado Si_3N_4 , con una tenacidad a la fractura de 3000 psi $\sqrt{\text{pulg}}$ en vez del sialon, se podrían repetir los cálculos y mostrar que, para la prueba ultrasónica, el grosor mínimo es de 0.56 pulg y el esfuerzo máximo es de sólo 24 000 psi.

7-3**Características microestructurales de fractura en materiales metálicos****Fractura dúctil**

La fractura dúctil por lo regular ocurre de una forma **transgranular** (a través de los granos) en los metales que tienen buena ductilidad y tenacidad. Con frecuencia se observa una cantidad considerable de deformación —incluyendo rebajo (estricción)— en el componente fallido. La deformación ocurre antes de la fractura final. Las fracturas dúctiles

**Figura 7-5**

Cuando se jala un material dúctil en una prueba de tensión, comienza el rebajo y se forman vacíos —comenzando cerca del centro de la barra— por la nucleación (formación de núcleos) en los límites de los granos o por inclusiones. A medida que la deformación continúa, puede formarse un borde cortante a 45°, lo que produce una fractura final de capa y cono.

por lo regular son ocasionadas por sobrecargas sencillas, o por la aplicación de un esfuerzo muy alto al material.

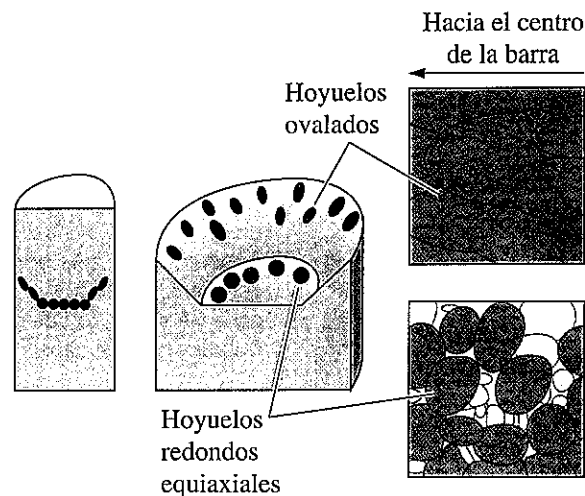
En una prueba de tensión simple, la fractura dúctil comienza con la formación de núcleos, crecimiento y coalescencia de los microvacíos en el centro de la barra de prueba (figura 7-5). Los **microvacíos** se forman cuando un esfuerzo alto ocasiona la separación del metal en los límites de los granos o interfaces entre el metal y las partículas impuras pequeñas (inclusiones). A medida que aumenta el esfuerzo local, los microvacíos crecen y se fusionan en cavidades más grandes. Con el tiempo, el área de contacto de metal con metal es demasiado pequeña para soportar la carga y ocurre la fractura.

La deformación por deslizamiento también contribuye a la fractura dúctil de un metal. Se sabe que el deslizamiento ocurre cuando el esfuerzo cortante resuelto alcanza el esfuerzo cortante resuelto crítico y que los esfuerzos cortantes resueltos son mayores a un ángulo de 45° con respecto al esfuerzo de tensión aplicado (capítulo 4, ley de Schmid).

Estos dos aspectos de la fractura dúctil dan las características distintivas de la superficie fallida. En las secciones metálicas gruesas, se espera encontrar evidencia de rebajo, con una porción significativa de la superficie de la fractura teniendo una cara plana cuando los microvacíos primero se nuclean y coalescen, y un borde cortante pequeño donde la superficie de la fractura está a un ángulo de 45° con respecto al esfuerzo aplicado. El borde cortante, que indica que ocurrió un deslizamiento, da a la fractura una apariencia de copa y cono (figuras 6-9 y 7-6). Una observación microscópica sencilla de esta fractura puede ser suficiente para identificar el modo de la fractura dúctil.

El examen de la superficie de la fractura a una magnificación alta —quizás utilizando un microscopio electrónico de barrido— revela una superficie con hoyuelos (figura 7-7). Los hoyuelos son indicios de los microvacíos producidos durante la fractura. Por lo general, estos microvacíos son redondos, o equiaxiales, cuando un esfuerzo de tensión normal produce la falla [figura 7-7a)]; sin embargo, en el borde cortante, los hoyuelos son de forma ovalada, o alargada, con los óvalos apuntando hacia el origen de la fractura [figura 7-7b)].

En una placa delgada se observa menos rebajo y toda la superficie de la fractura puede estar en una cara de corte. El examen microscópico de la superficie de la fractura muestra hoyuelos alargados en vez de hoyuelos equiaxiales, lo que indica una proporción de deslizamiento a 45° mayor que en los metales más gruesos.

**Figura 7-6**

Se forman hoyuelos durante la fractura dúctil. Se forman hoyuelos equiaxiales en el centro, donde crecen los microvacíos. Se forman hoyuelos alargados, que apuntan hacia el origen de la fractura, en el borde cortante. (Reimpresión cortesía de Don Askeland.)

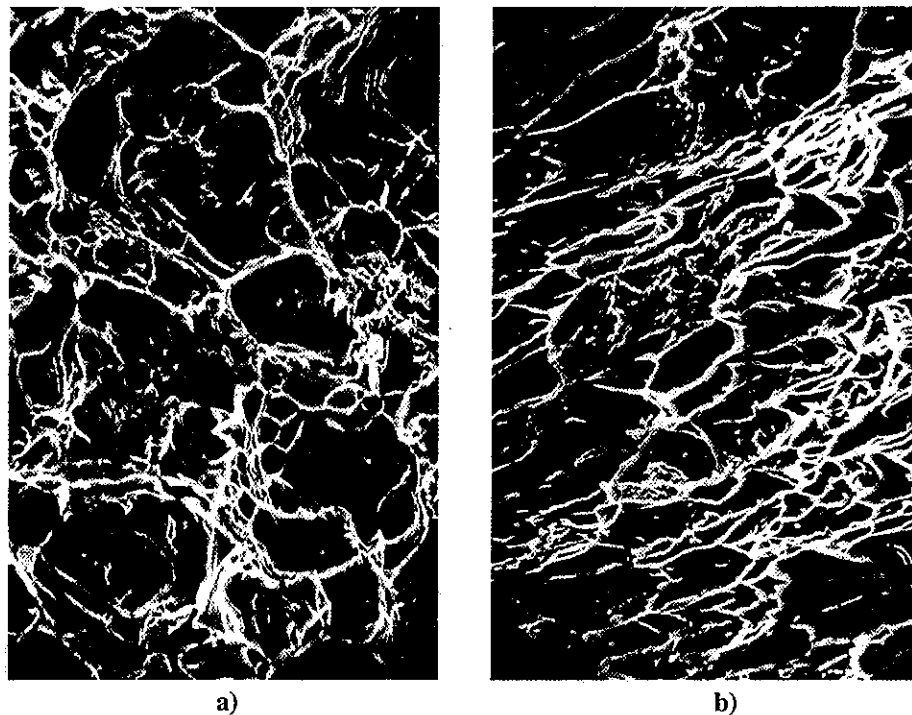


Figura 7-7 Micrografías electrónicas de barrido de un acero 1018 recocido que exhibe una fractura dúctil en una prueba de tensión. a) Los hoyuelos equiaxiales en el centro plano de la copa y el cono y b) los hoyuelos alargados en el borde cortante (1250 $\times$).

Ejemplo 7-4

Análisis de la falla de una cadena de levantamiento

Una cadena utilizada para levantar cargas pesadas falla. El examen del eslabón fallido indica una deformación y rebajo considerables antes de la falla. Enliste algunas de las posibles razones para la falla.

SOLUCIÓN

Esta descripción sugiere que la cadena falló de una manera dúctil por una sobrecarga de tensión simple. Dos factores podrían ser responsables de esta falla:

1. La carga excedió la capacidad de levantamiento de la cadena. Por tanto, el esfuerzo debido a la carga excedió la resistencia a la tensión última de la cadena, lo que permitió la falla. La comparación de la carga con las especificaciones del fabricante indicará que la cadena no estaba proyectada para tal carga pesada. ¡Esto es culpa del usuario!

2. El material de la cadena era de la composición equivocada o se trató de manera térmica de manera inapropiada. En consecuencia, la resistencia a la fluencia era menor que la pretendida por el fabricante y podría no soportar la carga. ¡Esto puede ser culpa del fabricante!

Fractura quebradiza La fractura quebradiza ocurre en metales y aleaciones de resistencia alta o en metales y aleaciones con ductilidad y tenacidad malas. Además, incluso los metales que por lo general son dúctiles pueden fallar de manera quebradiza a temperaturas bajas, en las secciones gruesas, a rapidez de deformación altas (como el impacto), o cuando las imperfecciones desempeñan una función importante. Las fracturas quebradizas se observan con frecuencia cuando el impacto, en vez de la sobrecarga, ocasiona la falla.

En la fractura quebradiza, se requiere poca o ninguna deformación plástica. La iniciación de la grieta por lo general ocurre en las imperfecciones pequeñas, lo cual ocasiona una concentración del esfuerzo. La grieta puede moverse a una rapidez aproximada a la velocidad del sonido en el metal. Por lo general, la grieta se propaga con la mayor facilidad a lo largo de planos cristalográficos específicos, con frecuencia los planos {100}, por desdoblamiento. Sin embargo, en algunos casos la grieta puede tomar una trayectoria **intergranular** (a lo largo de los límites de los granos), en particular cuando la segregación (separación preferencial de distintos elementos) o las inclusiones debilitan los límites de los granos.

La fractura quebradiza puede identificarse observando las características en la superficie fallida. Por lo general, la superficie de la fractura es plana y perpendicular al esfuerzo aplicado en una prueba de tensión. Si la falla ocurre por desdoblamiento de moléculas, cada grano fracturado es plano y está orientado de manera diferente, lo que le da una apariencia cristalina o de “caramelo macizo” a la superficie de la fractura (figura 7-8). Con frecuencia, la persona común asegura que el metal falló porque se cristalizó. Por supuesto, se sabe que el material metálico era cristalino para comenzar y que la apariencia de la superficie se debe a los planos de clivaje.

Otra característica común de la fractura es el **patrón en forma de V (Chevron)** (figura 7-9), producido por los frentes de la grieta separados que se propagan a distintos niveles en el material. Se forma un patrón radiante de marcas o bordes superficiales que irradian del origen de la grieta (figura 7-10). El patrón en forma de V es visible a simple vista o con una lupa y ayuda a identificar la naturaleza quebradiza del proceso de la falla al igual que el origen de la falla.

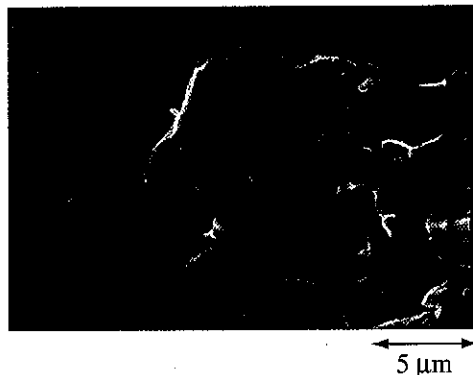


Figura 7-8

Micrografía electrónica de barrido de la superficie de una fractura quebradiza de un acero 1010 templado. (Cortesía de C. W. Ramsey.)

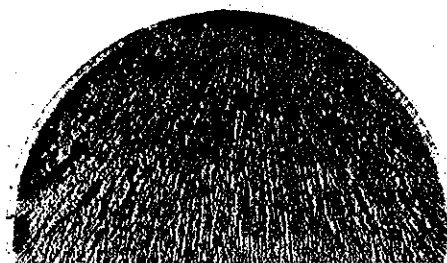


Figura 7-9
Patrón en forma de V en un acero 4340 templado de 0.5 pulg de diámetro. El acero falló de una manera quebradiza por un golpe de impacto. (Reimpresión cortesía de Don Askeland.)

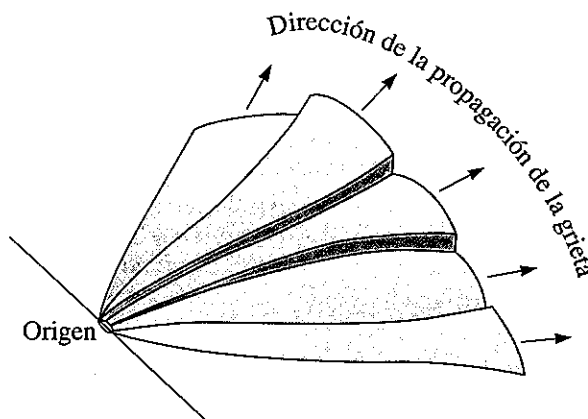


Figura 7-10
El patrón en forma de V se forma a medida que la grieta se propaga del origen a distintos niveles. El patrón apunta de vuelta al origen.

Ejemplo 7-5

Analisis de la falla del eje de un automóvil

Un ingeniero que investiga la causa de un accidente automotriz encuentra que el aro del neumático trasero derecho se ha roto en el eje. El eje está doblado. La superficie de la fractura revela un patrón en forma de V que apunta hacia la superficie del eje. Sugiera una causa posible para la fractura.

SOLUCIÓN

La evidencia sugiere que el eje no se rompió antes del accidente. El eje deformado significa que el neumático aún estaba unido cuando se aplicó la carga. El patrón en forma de V indica que el aro se sometió a un golpe de impacto intenso, el cual fue transmitido al eje. La evidencia preliminar sugiere que el conductor perdió el control y se estrelló, y la fuerza del choque ocasionó que el eje se rompiera. El examen posterior de la superficie, la microestructura, la composición y las propiedades de la fractura pueden verificar que el eje se fabricó de manera apropiada.

7-4

Características microestructurales de las fracturas en cerámicas, vidrios y compuestos

En los materiales cerámicos, los enlaces iónicos o covalentes permiten poco o ningún deslizamiento. En consecuencia, la falla es resultado de la fractura quebradiza. La mayoría de las cerámicas quebradizas fallan por la ruptura a lo largo de planos compactos espaciados de

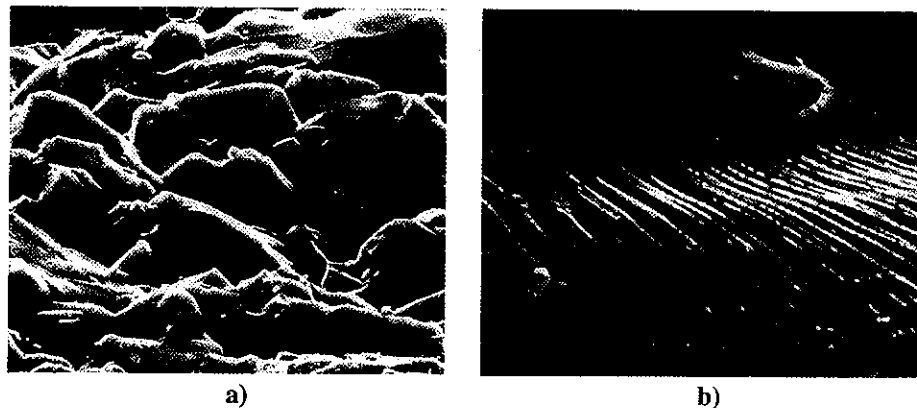


Figura 7-11 Micrografías electrónicas de barrido de las superficies de la fractura en las cerámicas. a) Superficie de la fractura del Al_2O_3 , que muestra los planos de clivaje ($1250\times$) y b) superficie de la fractura del vidrio, que muestra la zona especular (superior) y las líneas de rasgado características de una fractura concoidal ($300\times$). (Reimpresión cortesía de Don Askeland.)

manera amplia. La superficie de la fractura por lo regular es lisa y con frecuencia sin características superficiales distintivas que apunten al origen de la fractura [figura 7-11a)].

Los vidrios también se fracturan de una manera quebradiza. Con frecuencia se observa una superficie de **fractura concoidal**. Esta superficie contiene una zona especular lisa cerca del origen de la fractura, con líneas de rasgado que abarcan el resto de la superficie [figura 7-11b)]. Las líneas de rasgado apuntan de vuelta a la zona especular y al origen de la grieta, de manera muy parecida al patrón en forma de V en los metales.

Los polímeros pueden fallar por medio de un mecanismo dúctil o por medio de uno quebradizo. Debajo de la temperatura de transición vítrea (T_v), los polímeros termoplásticos fallan de una manera quebradiza —de modo muy parecido vítrea—. Asimismo, los polímeros termoestables duros, los cuales tienen una estructura enlazada de manera cruzada tridimensional (véase el capítulo 16) fallan por medio de un mecanismo quebradizo. Algunos plásticos con estructuras que consisten en cadenas enredadas pero no enlazadas de manera cruzada químicamente fallan en forma dúctil por encima de la temperatura de transición vítrea, lo que da evidencia de la deformación extensiva e incluso de rebajo antes de la falla. El comportamiento dúctil es un resultado del deslizamiento de las cadenas de polímero, lo cual no es posible en los polímeros termoestables.

La fractura en los materiales compuestos reforzados con fibras es más compleja. Por lo regular, estos compuestos contienen fibras quebradizas resistentes rodeadas por una matriz dúctil blanda, como en el aluminio reforzado con boro. Cuando se aplica un esfuerzo de tensión a lo largo de las fibras, el aluminio blando se deforma de manera dúctil, con la formación y coalescencia de vacíos que con el tiempo producen una superficie de fractura con hoyuelos. A medida que el aluminio se deforma, la carga ya no es transmitida de manera efectiva entre las fibras y la matriz; las fibras se rompen de manera quebradiza hasta que quedan tan pocas de ellas intactas para soportar la carga final.

La fractura es más común si el enlazamiento entre las fibras y la matriz es malo. Entonces pueden formarse vacíos entre las fibras y la matriz, ocasionando disgregación. También pueden formarse vacíos entre las capas de la matriz si las cintas u hojas del compuesto no están enlazadas de manera apropiada, lo que ocasiona **delaminación** (figura 7-12). La delaminación, en este contexto, se refiere a cuando las capas de distintos materiales en un compuesto comienzan a separarse.

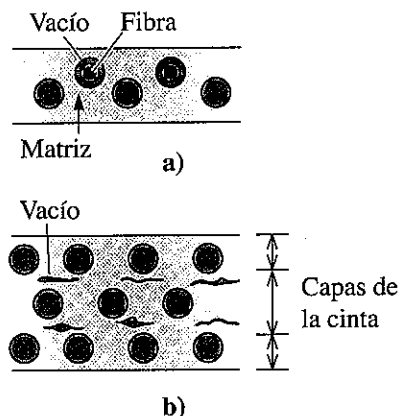


Figura 7-12

Los compuestos reforzados con fibras pueden fallar por medio de varios mecanismos. a) Debido al enlazamiento débil entre la matriz y las fibras, pueden formarse vacíos, los cuales conducen a que las fibras se separen. b) Si las capas individuales de la matriz están enlazadas de manera deficiente, la matriz puede delaminarse, creando vacíos.

Ejemplo 7-6**Fractura en los compuestos**

Describe la diferencia en el mecanismo de fractura entre un compuesto de aluminio reforzado con boro y un compuesto epoxi reforzado con fibras de vidrio.

SOLUCIÓN

En el compuesto de boro-aluminio, la matriz de aluminio es blanda y dúctil; por tanto, se espera que la matriz falle de manera dúctil. Por el contrario, las fibras de boro fallan de modo quebradizo. Las fibras de vidrio y el epoxi son quebradizos; por tanto el compuesto como un todo debe mostrar poca evidencia de fractura dúctil.

7-5**Estadística de Weibull para el análisis de la resistencia a la falla**

Se necesita un método estadístico cuando se evalúa la resistencia de los materiales cerámicos. La resistencia de las cerámicas y los vidrios depende del tamaño y la distribución de los tamaños de las imperfecciones. En estos materiales, se originan imperfecciones durante el procesamiento a medida que se fabrica la cerámica. Las imperfecciones pueden formarse durante el maquinado, molido, etc. Los vidrios también pueden desarrollar microgrietas como resultado de la interacción con el vapor de agua en el aire. Si se prueba la alúmina u otros componentes cerámicos de distintos tamaños y geometrías, con frecuencia se encuentra una gran dispersión en los valores medidos —incluso si su composición nominal es la misma—. De manera similar, si se prueba la resistencia de las fibras de vidrio de una composición dada, se encuentra que, en promedio, las fibras más cortas son más resistentes que las fibras más largas. La resistencia de las cerámicas y los vidrios depende de la probabilidad de encontrar una imperfección que exceda un cierto tamaño crítico. Esta probabilidad aumenta a medida que se incrementa el tamaño del componente o la longitud de las fibras. Como resultado, es probable que la resistencia de los componentes o fibras más grandes sea menor que la de los componentes más pequeños o fibras más cortas. En los materiales metálicos o poliméricos, los cuales pueden exhibir deformaciones plásticas relativamente grandes, el efecto de la distribución de las imperfecciones y del tamaño de las imperfecciones no se siente igual que en las cerámicas y vidrios. En estos materiales, la iniciación de las grietas a partir de las imperfecciones es entorpecida por la deformación plástica. Por tanto, para los materiales dúctiles, la distribución de la resistencia es estrecha y cercana a una distribución gaussiana. Sin embargo, la resistencia de las cerámicas y los vidrios varía de manera considerable (es decir, si se prueba un gran número de muestras idénticas de vidrio de sílice o de la cerámica alúmina, la información mostrará una

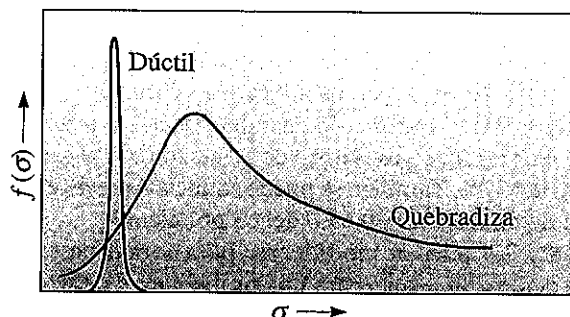


Figura 7-13

La distribución de Weibull describe la fracción de las muestras que fallan a cualquier esfuerzo aplicado dado.

dispersión amplia debido a los cambios en la distribución de los tamaños de las fisuras). La resistencia de los materiales quebradizos, como las cerámicas y los vidrios, no es gaussiana; está dada por la **distribución de Weibull**. La distribución de Weibull es un indicador de la variabilidad de la resistencia de los materiales que resulta de una distribución de los tamaños de las imperfecciones. Este comportamiento resulta a partir de las imperfecciones de tamaño crítico en los materiales con una distribución de los tamaños de las imperfecciones (es decir, la falla se debe al eslabón más débil de una cadena).

La distribución de Weibull mostrada en la figura 7-13 describe la fracción de las muestras que fallan a distintos esfuerzos aplicados. A esfuerzos bajos, una pequeña fracción de las muestras contiene imperfecciones lo suficientemente grandes para ocasionar una fractura; la mayoría falla a un esfuerzo aplicado intermedio y unas cuantas sólo contienen imperfecciones pequeñas y no fallan hasta que se aplican esfuerzos grandes. Para poder predecir, se prefiere una distribución muy estrecha.

Considere un cuerpo de volumen V con una distribución de las imperfecciones y sujeto a un esfuerzo σ . Si se supone que el volumen, V , consistía de n elementos con volumen V_0 y cada elemento tenía la misma distribución de los tamaños de las imperfecciones, puede demostrarse que la probabilidad de supervivencia, $P(V_0)$ (es decir, la probabilidad de que un material quebradizo no se fracturará bajo el esfuerzo aplicado σ) está dada por

$$P(V_0) = \exp \left[- \left(\frac{\sigma - \sigma_{\min}}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (7-6)$$

La probabilidad de falla, $F(V_0)$, puede escribirse como

$$F(V_0) = 1 - P(V_0) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma - \sigma_{\min}}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (7-7)$$

En las ecuaciones 7-6 y 7-7, σ es el esfuerzo aplicado, σ_0 es el parámetro escalable dependiente del tamaño y la forma del espécimen, $\sigma_{\min}$ es el nivel de esfuerzo debajo del cual la probabilidad de falla es cero (es decir, la probabilidad de supervivencia es de 1.0). En estas ecuaciones, m es el **módulo de Weibull**. En teoría, los valores del módulo de Weibull pueden ir de 0 a ∞ . El módulo de Weibull es una medida de la variabilidad de la resistencia del material.

El módulo de Weibull m indica la variabilidad de la resistencia. Para los metales y aleaciones, el módulo de Weibull es de ~ 100 . Para las cerámicas tradicionales (por ejemplo, ladrillos, alfarería, etc.), el módulo de Weibull es menor a 3. Las cerámicas de ingeniería, en las que el procesamiento está mejor controlado y por tanto se espera que el número de imperfecciones sea menor, tienen un módulo de Weibull de 5 a 10.

Observe que para las cerámicas y otros sólidos quebradizos, se puede suponer que $\sigma_{\min} = 0$. Esto se debe a que no existe un nivel de esfuerzo distinto de cero para el que se puede aseverar que un material quebradizo no fallará. Para los *materiales quebradizos* las ecuaciones 7-6 y 7-7 pueden reescribirse como a continuación:

$$P(V_0) = \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (7-8)$$

y

$$F(V_0) = 1 - P(V_0) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (7-9)$$

A partir de la ecuación 7-8, para un esfuerzo aplicado σ de cero, la probabilidad de supervivencia es de 1. A medida que el esfuerzo aplicado σ aumenta, $P(V_0)$ disminuye, aproximándose a cero a valores muy altos de los esfuerzos aplicados. También se puede describir otro significado del parámetro σ_0 . En la ecuación 7-8, cuando $\sigma = \sigma_0$, la probabilidad de supervivencia se vuelve $1/e \approx 0.37$. Por tanto, σ_0 es el nivel de esfuerzo para el que la probabilidad de supervivencia es de ≈ 0.37 o del 37%. También se puede enunciar que σ_0 es el nivel de esfuerzo para el que la probabilidad de falla es de ≈ 0.63 o del 63 por ciento.

Las ecuaciones 7-8 y 7-9 pueden modificarse para tomar en cuenta muestras con distintos volúmenes. Puede demostrarse que, para una probabilidad de supervivencia igual, las muestras con volúmenes más grandes tendrán resistencias menores. Esto es lo que se mencionó anteriormente (por ejemplo, las fibras de vidrio más largas serán más débiles que las fibras de vidrio más cortas).

Los siguientes ejemplos ilustran cómo pueden utilizarse las gráficas de Weibull para el análisis de las propiedades mecánicas de los materiales y para el diseño de componentes.

Ejemplo 7-7

Módulo de Weibull para el acero y las cerámicas de alúmina

La figura 7-14 muestra las gráficas log-log de la probabilidad de falla y la resistencia de un acero simple al 0.2% de carbono y una cerámica de alúmina preparada utilizando el procesamiento de polvos convencional en el que los polvos de alúmina se compactan en una prensa y se sinterizan en una masa densa a una temperatura alta. También se incluye una gráfica de las cerámicas de alúmina preparadas utilizando técnicas especiales que conducen a un tamaño de las partículas mucho más uniforme y controlado. Esto a su vez minimiza las imperfecciones. Estas muestras se etiquetan como tamaño controlado de las partículas (TCP). Comente sobre la naturaleza de estas gráficas.

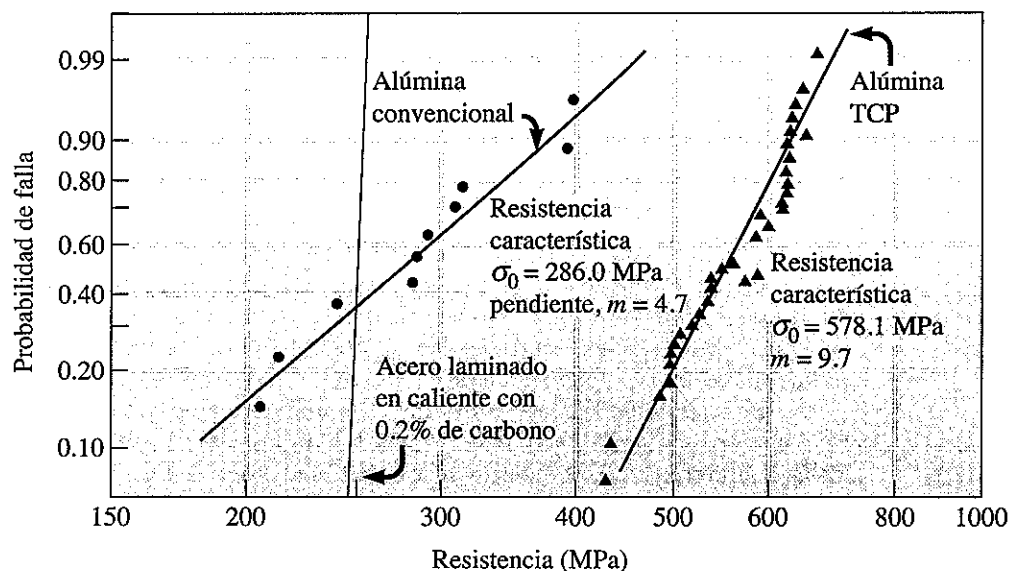


Figura 7-14 Gráfica acumulativa de la probabilidad de que una muestra fallará en un esfuerzo dado que produce el módulo o pendiente de Weibull. La alúmina producida por medio de dos métodos distintos es comparada con el acero al bajo carbono. Se obtiene una buena confiabilidad en el diseño para un módulo de Weibull alto. (Adaptada de Mechanical Behavior of Materials, por M. A. Meyers y K. K. Chawla. Copyright © 1999 Prentice Hall. Adaptada con permiso de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.)

SOLUCIÓN

La probabilidad de falla y la resistencia cuando se grafican en una escala log-log resulta en información que puede ajustarse a una línea recta. La pendiente de la línea provee la medida de la variabilidad (es decir, el módulo de Weibull).

Para el acero al carbono simple la línea es casi vertical (es decir, la pendiente o valor de m se aproxima a valores grandes). Esto significa que hay muy poca variación (de 5 a 10%) en la resistencia de las distintas muestras del acero al 0.2% C.

Para las cerámicas de alúmina preparadas utilizando el procesamiento tradicional, la variabilidad es alta (es decir, m es menor a ~ 4.7).

Para las cerámicas preparadas utilizando técnicas de procesamiento mejoradas y controladas, m es mayor a ~ 9.7 lo que indica una distribución más uniforme de las imperfecciones. La resistencia característica (σ_0) también es mayor (~ 578 MPa) lo que sugiere una menor cantidad de imperfecciones que conducirán a la fractura.

Ejemplo 7-8

Resistencia de las cerámicas y probabilidad de falla

Una cerámica de ingeniería avanzada tiene un módulo de Weibull $m = 9$. La resistencia a la flexión es de 250 MPa a una probabilidad de falla $F = 0.4$. ¿Cuál es el nivel de la resistencia a la flexión si la probabilidad de falla tiene que ser de 0.1?

SOLUCIÓN

Se supone que todas las muestras probadas tenían el mismo volumen, por tanto el tamaño de la muestra no será un factor en este caso. Se puede utilizar el símbolo V para denotar el volumen de la muestra en vez de V_0 . Se está tratando con un material quebradizo por lo que se comienza con la ecuación 7-9:

$$F(V) = 1 - P(V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right]$$

o

$$1 - F(V) = \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right]$$

Obtenga el logaritmo de ambos lados:

$$\ln[1 - F(V)] = -\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m$$

Obtenga de nuevo los logaritmos de ambos lados,

$$\ln\{-\ln[1 - F(V)]\} = m(\ln \sigma - \ln \sigma_0) \quad (7-10)$$

Se puede eliminar el signo negativo en el lado izquierdo de la ecuación 7-10 reescribiendo la ecuación como

$$\ln\left\{\ln\left[\frac{1}{1 - F(V)}\right]\right\} = m(\ln \sigma - \ln \sigma_0) \quad (7-11)$$

Para $F = 0.4$, $\sigma = 250$ MPa y $m = 9$ en la ecuación 7-11, se tiene

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - 0.4} \right) \right] = 9(\ln 250 - \ln \sigma_0) \quad (7-12)$$

Por tanto,

$$\begin{aligned} \ln[\ln(1/0.6)] &= \ln[\ln(1.66667)] = \ln(0.510826) = -0.67173 \\ &= 9(5.52146 - \ln \sigma_0) \end{aligned}$$

Por tanto, $\ln \sigma_0 = 5.52146 + 0.07464 = 5.5961$. Esto da un valor de $\sigma_0 = 269.4$ MPa. Ésta es la resistencia característica de la cerámica. Para un nivel de esfuerzo de 269.4 MPa, la probabilidad de supervivencia es de 0.37 (o la probabilidad de falla es de 0.63). A medida que disminuye la probabilidad de falla (F), el nivel de esfuerzo al cual puede sujetarse la cerámica (σ) también disminuye. Observe que si la ecuación 7-12 se resuelve de manera exacta para σ_0 , se obtiene un valor ligeramente diferente.

Ahora, se desea determinar el valor de σ para $F = 0.1$. Se sabe que $m = 9$ y $\sigma_0 = 269.4$ MPa, por lo que se necesita obtener el valor de σ . Se sustituyen estos valores en la ecuación 7-11:

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - 0.1} \right) \right] = 9(\ln \sigma - \ln 269.4)$$

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{0.9} \right) \right] = 9(\ln \sigma - \ln 269.4)$$

$$\ln(\ln 1.11111) = \ln(0.105361) = -2.25037 = 9(\ln \sigma - 5.5962)$$

$$\therefore -0.25004 = \ln \sigma - 5.5962, \text{ o}$$

$$\ln \sigma = 5.3462$$

o $\sigma = 209.8$ MPa. Como se esperaba, a medida que se disminuye la probabilidad de falla a 0.1, también se disminuye el nivel del esfuerzo que puede soportarse.

Ejemplo 7-9

Determinación del parámetro del módulo de Weibull

Se probaron siete especímenes de carburo de silicio y se obtuvieron las siguientes resistencias a la fractura: 23, 49, 34, 30, 55, 43 y 40 MPa. Calcule el módulo de Weibull para los datos ajustando la información a la ecuación 7-11. Explique la confiabilidad de la cerámica.

SOLUCIÓN

Primero, observe que para cualquier tipo de análisis estadístico se necesita un gran número de muestras. Siete muestras no son suficientes. El propósito de este ejemplo es ilustrar el cálculo.

Un método sencillo aunque no exacto por completo para determinar el comportamiento de la cerámica es asignar un valor numérico (1 a 7) a los especímenes, con el espécimen que tiene la resistencia a la fractura más baja asignado con el valor de 1. El número total de especímenes es n (en este caso, 7). La probabilidad de falla F es entonces el valor numérico dividido entre $n + 1$ (en este caso, 8). Se puede graficar

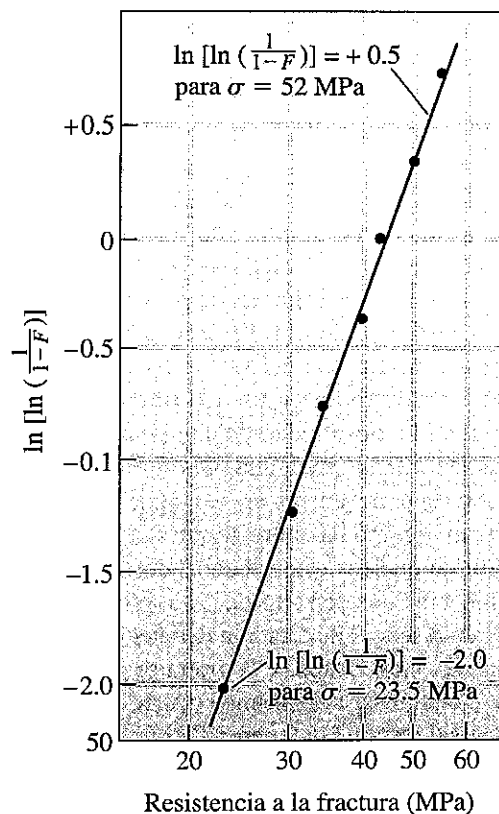


Figura 7-15

Gráfica de la probabilidad acumulativa de la falla en función del esfuerzo de fractura. Observe que la resistencia a la fractura se graficó en una escala logarítmica.

entonces $\ln\{\ln 1/[1 - F(V_0)]\}$ en función del $\ln \sigma$. La siguiente tabla y la figura 7-15 muestran los resultados de estos cálculos. Observe que σ se graficó en una escala logarítmica.

<i>i</i> mo espécimen	σ (MPa)	$F(V_0)$	$\ln\{\ln 1/[1 - F(V_0)]\}$
1	23	1/8 = 0.125	-2.013
2	30	2/8 = 0.250	-1.246
3	34	3/8 = 0.375	-0.755
4	40	4/8 = 0.500	-0.367
5	43	5/8 = 0.625	-0.019
6	49	6/8 = 0.750	+0.327
7	55	7/8 = 0.875	+0.732

La pendiente de la línea ajustada, o el módulo de Weibull m , es (utilizando los dos puntos indicados en la curva):

$$m = \frac{0.5 - (-2.0)}{\ln(52) - \ln(23.5)} = \frac{2.5}{3.951 - 3.157} = 3.15$$

Este módulo de Weibull bajo de 3.15 sugiere que la cerámica tiene una resistencia a la fractura altamente variable, lo que hace difícil la confiabilidad de su uso en aplicaciones de soporte de carga.

7-6 Fatiga

La *fatiga* es la disminución de la resistencia o falla de un material debido a un esfuerzo repetitivo el cual puede estar por encima o debajo de la resistencia a la fluencia. Es un fenómeno común en los componentes de soporte de carga en automóviles y aviones, álabes de turbinas, amortiguadores, cigüeñales y demás maquinaria, implantes biomédicos y productos de consumo, como calzado, que están sujetos de manera constante a esfuerzos repetitivos en la forma de tensión, compresión, flexión, vibración, expansión térmica y contracción u otros esfuerzos. Estos esfuerzos con frecuencia están *debajo* de la resistencia a la fluencia del material; sin embargo, cuando el esfuerzo ocurre un número suficiente de veces, ocasiona falla por fatiga! Una gran fracción de componentes encontrados en un depósito de chatarra de automóviles pertenece a los que fallaron por fatiga. La posibilidad de una falla por fatiga es la razón principal de por qué los componentes de aviones tienen una vida finita.

Las fallas por fatiga por lo regular ocurren entre etapas. Primero, se inicia o nuclea una grieta pequeña con frecuencia un tiempo bastante después de que comienza la carga. Por lo general, los sitios de formación de núcleos están localizados en o cerca de la superficie, donde el esfuerzo está a un máximo e incluye defectos de la superficie como rayaduras o picaduras, esquinas afiladas debidas a un diseño o fabricación deficiente, inclusiones, límites de los granos o concentraciones de dislocaciones. Después, la grieta se propaga de manera gradual a medida que la carga continúa ciclándose. Por último, ocurre una fractura repentina del material cuando la sección transversal restante del material es muy pequeña para soportar la carga aplicada. Por tanto, los componentes fallan por fatiga aun cuando el esfuerzo aplicado total puede permanecer debajo del límite elástico, a una escala de longitud local, el esfuerzo excede por mucho la resistencia a la tensión. Para que ocurra la fatiga, al menos una parte del esfuerzo en el material tiene que ser de tensión. Por lo general se trata con la fatiga de materiales metálicos y poliméricos.

En las cerámicas, por lo general no se considera la fatiga dado que éstas por lo regular fallan debido a su baja tenacidad a la fractura. Cualquier grieta por fatiga que pueda formarse disminuirá la vida útil de la cerámica dado que ocasionará la disminución de la tenacidad a la fractura. En general, las cerámicas se diseñan para carga estática (y no cíclica) y se toma en cuenta el módulo de Young.

Los materiales poliméricos también muestran falla por fatiga. El mecanismo de fatiga en los polímeros es distinto al de los materiales metálicos. En los polímeros, a medida que los materiales se sujetan a esfuerzos repetitivos, puede ocurrir un calentamiento considerable cerca de las puntas de las grietas y las interrelaciones entre la fatiga y otro mecanismo, conocido como *termofluencia* (explicado en la sección 7-9), afecta el comportamiento general.

La fatiga también es importante al tratar con compuestos. A medida que las fibras u otras fases de refuerzo comienzan a degradarse como resultado de la fatiga, el módulo elástico total del compuesto disminuye y este debilitamiento se observará antes de la fractura debido a la fatiga.

Las fallas por fatiga con frecuencia son fáciles de identificar. La superficie de la fractura —en particular cerca del origen— por lo regular es lisa. La superficie se vuelve más áspera a medida que la grieta original aumenta de tamaño y puede ser fibrosa durante la propagación final de la grieta. Los exámenes microscópicos y macroscópicos revelan una superficie de la fractura que incluye un patrón de marcas de playa y estriaciones (figura 7-16). Por lo regular se forman **marcas de playa** o **de almeja** (figura 7-17) cuando se cambia la carga durante el servicio o cuando la carga es intermitente, quizás permitiendo el tiempo para la oxidación dentro de la grieta. Las **estriaciones**, las cuales están en una escala mucho más fina, muestran la posición de la punta de la grieta después de cada ciclo. Las marcas de playa siempre sugieren una falla por fatiga, pero —desafortunadamente— la ausencia de marcas de playa no descarta la falla por fatiga.

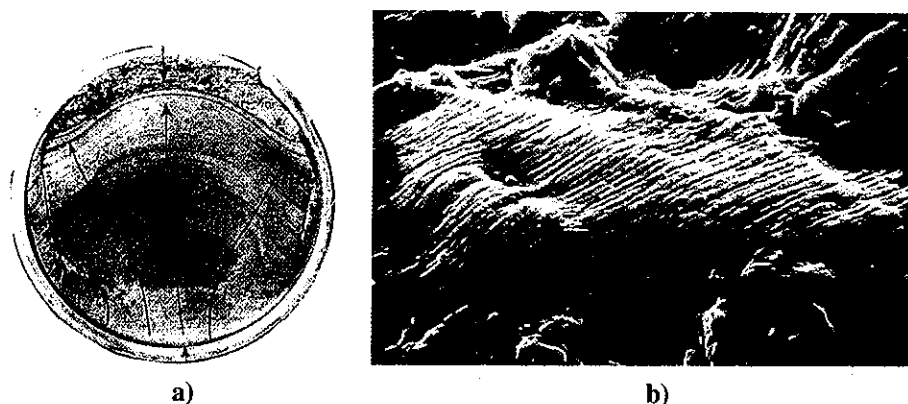


Figura 7-16 Superficie de fractura por fatiga. a) A magnificaciones bajas, el patrón de marcas de playa indica la fatiga como el mecanismo de fractura. Las flechas muestran la dirección del crecimiento del frente de la grieta con el origen en la parte inferior de la fotografía. (La imagen a) es de C. C. Cottell, "Fatigue Failures with Special Reference to Fracture Characteristics", Failure Analysis: The British Engine Technical Reports, American Society for Metals, 1981, p. 318.) b) A magnificaciones muy altas, se observan las estriaciones espaciadas de manera compacta formadas durante la fatiga (1000 $\times$). (Reimpresión cortesía de Don Askeland.)

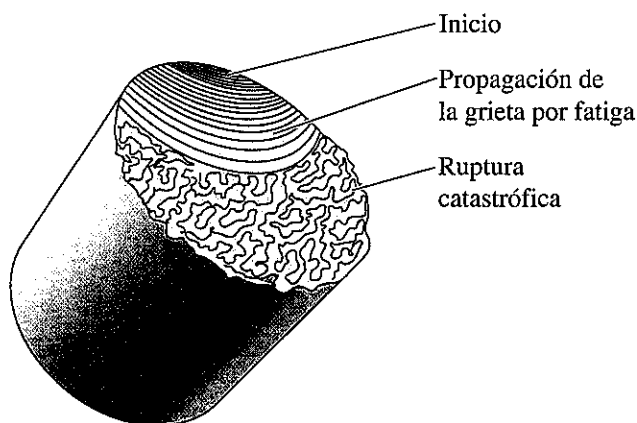


Figura 7-17

Representación esquemática de una superficie de fractura por fatiga en un eje de acero, que muestra la región de inicio, la propagación de la grieta por fatiga (con marcas de playa) y la ruptura catastrófica cuando la longitud de la grieta excede un valor crítico al esfuerzo aplicado.

Ejemplo 7-10

Análisis de la falla por fatiga de un cigüeñal

Un cigüeñal en un motor diesel falla. El examen del cigüeñal no revela deformación plástica. La superficie de la fractura es lisa. Además, aparecen varias otras grietas en otras localizaciones en el cigüeñal. ¿Qué tipo de mecanismo de falla ocurrió?

SOLUCIÓN

Dado que el cigüeñal es una parte rotatoria, la superficie experimenta carga cíclica. La fatiga debe sospecharse de inmediato. La ausencia de deformación plástica respalda la sospecha. Además, la presencia de otras grietas es consistente con la fatiga; las otras grietas no tuvieron tiempo para crecer al tamaño que produjo la falla catastrófica. El examen de la superficie de la fractura probablemente revelará marcas de playa o estriaciones por fatiga.

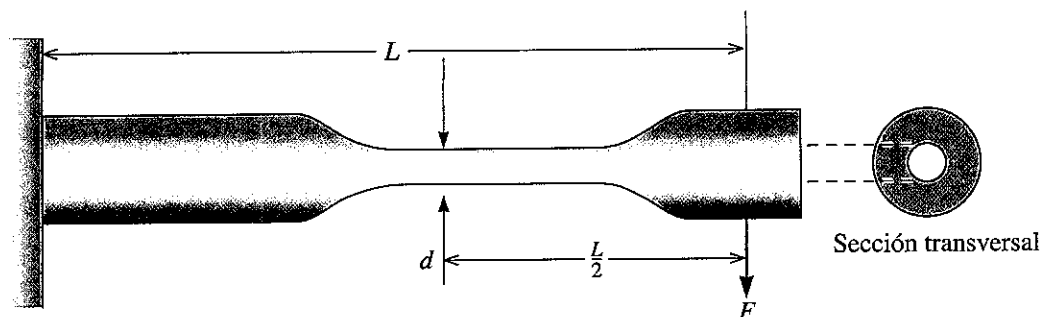


Figura 7-18 Geometría para la configuración del espécimen de la viga rotatoria en voladizo.

Un método convencional más antiguo utilizado para medir la resistencia a la fatiga de un material es la **prueba con viga rotatoria en voladizo** (figura 7-18). Un extremo de un espécimen maquinado cilíndrico se monta en una prensa de sujeción accionado por motor. Se suspende un peso del extremo opuesto. El espécimen tiene inicialmente una fuerza de tensión que actúa sobre la superficie superior, mientras que la superficie inferior está comprimida. Después de que el espécimen gira 90° , las localizaciones que estaban originalmente en tensión y compresión ya no tienen esfuerzo que actúe sobre ellas. Después de una media revolución de 180° , el material que estaba originalmente en tensión ahora está en compresión. Por tanto, el esfuerzo en cualquier punto pasa a través de un ciclo senoidal completo de un esfuerzo de tensión máximo a un esfuerzo de compresión máximo. El esfuerzo máximo que actúa sobre este tipo de espécimen está dado por

$$\pm \sigma = \frac{32 M}{\pi d^3} \quad (7-13a)$$

En esta ecuación M es el momento de flexión en la sección transversal y d es el diámetro del espécimen. El momento de flexión $M = F \cdot (L/2)$, y por tanto,

$$\pm \sigma = \frac{16 FL}{\pi d^3} = 5.09 \frac{FL}{d^3} \quad (7-13b)$$

donde L es la distancia entre la localización de la fuerza de flexión y el soporte (figura 7-18), F es la carga y d es el diámetro.

Las máquinas más recientes utilizadas para la prueba de fatiga se conocen como máquinas de carga directa. En estas máquinas, un sistema servohidráulico, un activador y un sistema de control, gobernados por computadoras, aplican una fuerza, una deflexión, un desplazamiento o una deformación deseados. En algunas de estas máquinas, también pueden controlarse la temperatura y la atmósfera (por ejemplo, el nivel de humedad).

Después de un número suficiente de ciclos en una prueba de fatiga, el espécimen puede fallar. Por lo general, se prueba una serie de especímenes a distintos esfuerzos aplicados. Los resultados se presentan como una **curva S-N** (también conocida como **curva de Wöhler**), con el esfuerzo (S) graficado en función del número de ciclos (N) a la falla (figura 7-19).

7-7

Resultados de la prueba de fatiga

La **prueba de fatiga** puede indicar cuánto puede sobrevivir una pieza o las cargas máximas permisibles que pueden aplicarse sin ocasionar la falla. El **límite de resistencia a la fatiga**, el cual es el esfuerzo debajo del cual existe un 50% de probabilidad de que la falla por fatiga nunca

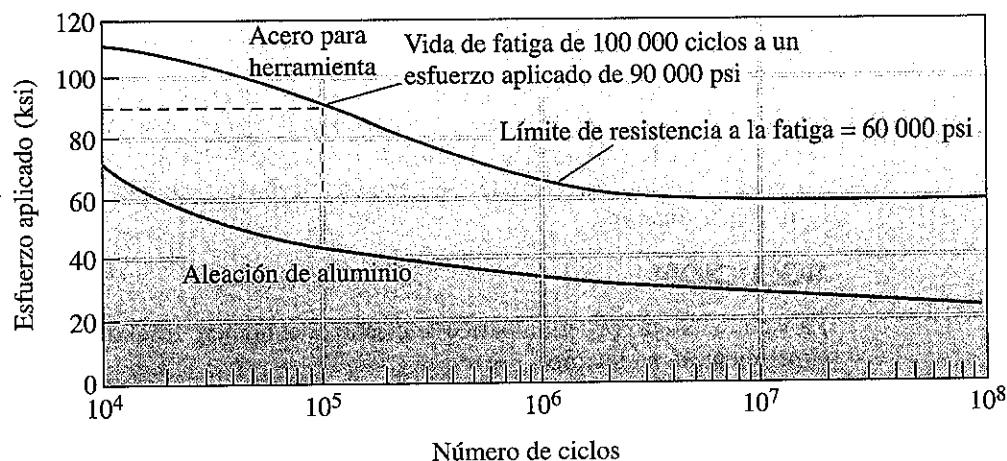


Figura 7-19 Curvas de esfuerzo-número de ciclos a la falla (S-N) en un acero para herramienta y una aleación de aluminio.

ocurra, es el criterio de diseño preferido. Para prevenir que la parte de acero para herramienta falle (figura 7-19), se debe asegurar que el esfuerzo aplicado sea menor que 60 000 psi. La suposición de la existencia de un límite de resistencia a la fatiga es un concepto relativamente viejo. La investigación reciente sobre muchos metales ha mostrado que es probable que no exista un límite de resistencia a la fatiga. También se necesita explicar la presencia de corrosión, sobrecargas ocasionales y otros mecanismos que pueden ocasionar que el material falle debajo del límite de resistencia a la fatiga. Por tanto, los valores para un límite de resistencia a la fatiga deben tratarse con cuidado.

La **vida de fatiga** indica cuánto sobrevive un componente a un esfuerzo en particular. Por ejemplo, si el acero para herramienta (figura 7-19) se sujeta de manera cíclica a un esfuerzo aplicado de 90 000 psi, la vida de fatiga será de 100 000 ciclos. Conociendo el tiempo asociado con cada ciclo, se puede calcular un valor de vida de fatiga en años. La **resistencia a la fatiga** es el esfuerzo máximo para el cual la fatiga no ocurrirá dentro de un número particular de ciclos, como 500 000 000. La resistencia a la fatiga es necesaria para el diseño con aluminio y polímeros, los cuales no poseen límite de resistencia.

En algunos materiales, incluyendo los aceros, el límite de resistencia es de aproximadamente la mitad de la resistencia a la tensión. La razón entre el límite de resistencia y la resistencia a la tensión se conoce como **razón de resistencia**:

$$\text{Razón de resistencia} = \frac{\text{límite de resistencia a la fatiga}}{\text{resistencia a la tensión}} \approx 0.5 \quad (7-14)$$

La razón de resistencia a la fatiga permite calcular las propiedades de fatiga a partir de la prueba de tensión. Los valores de la razón de resistencia a la fatiga son de ~0.3 a 0.4 para los materiales metálicos distintos de los aceros de baja y media resistencia. *De nuevo, recuerde la nota de advertencia de que mediante una investigación ha demostrado que no existe un límite de resistencia para muchos materiales.*

La mayoría de los materiales son **sensibles a muescas**, con las propiedades de fatiga particularmente sensibles a las imperfecciones en la superficie. Los defectos de diseño o fabricación concentran los esfuerzos y reducen el límite de resistencia a la fatiga, la resistencia a la fatiga, o la vida a fatiga. En algunas ocasiones se preparan superficies muy pulidas para minimizar la probabilidad de una falla por fatiga. El **granallado** es un proceso que se utiliza de manera muy efectiva para aumentar la vida a fatiga de los materiales. Se disparan esferas metálicas pequeñas al componente. Esto conduce a un esfuerzo de compresión residual en la superficie de manera similar al **templado** de vidrios inorgánicos.

Ejemplo 7-11*Diseño de una flecha giratoria*

La flecha sólida para un horno de cemento producida a partir del acero para herramienta de la figura 7-19 debe ser de 96 pulg de largo y debe sobrevivir a la operación continua por un año con una carga aplicada de 12 500 lb. La flecha realiza una revolución por minuto durante la operación. Diseñe una flecha que cumpla de manera satisfactoria estos requerimientos.

SOLUCIÓN

La vida de fatiga requerida para este diseño es el número total de ciclos N que la flecha experimentará en un año:

$$N = (1 \text{ ciclo/min})(60 \text{ min/h})(24 \text{ h/d})(365 \text{ d/a}).$$

$$N = 5.256 \times 10^5 \text{ ciclos/a}$$

donde a = año, d = día y h = hora.

A partir de la figura 7-19, el esfuerzo aplicado por tanto, debe ser menor de alrededor 72 000 psi. Utilizando la ecuación 7-13, el diámetro de la flecha está dado por

$$\begin{aligned} \pm \sigma &= \frac{16FL}{\pi d^3} = 5.09 \frac{FL}{d^3} \\ 72\,000 \text{ psi} &= \frac{(5.09)(12\,500 \text{ lb})(96 \text{ pulg})}{d^3} \\ d &= 4.39 \text{ pulg} \end{aligned}$$

Una flecha con un diámetro de 4.39 pulg debe operar por un año en estas condiciones; sin embargo, probablemente deba incorporarse en el diseño un margen significativo de seguridad. Además, podría considerarse producir una flecha que nunca falle.

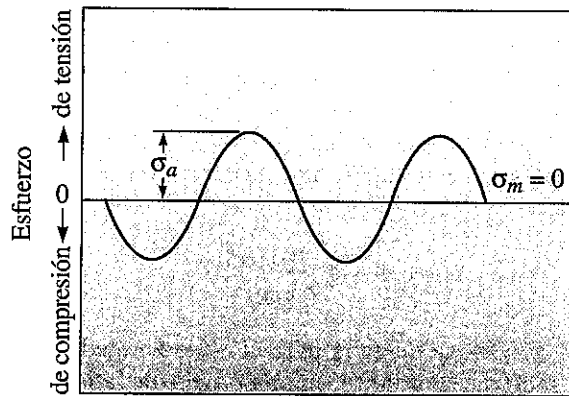
Se supone un factor de seguridad de 2 (es decir, se supondrá que el nivel de esfuerzo máximo permisible será de $72\,000/2 = 36\,000$ psi). El diámetro mínimo requerido para prevenir la falla sería ahora

$$\begin{aligned} 36\,000 \text{ psi} &= \frac{(5.09)(12\,500 \text{ lb})(96 \text{ pulg})}{d^3} \\ d &= 5.54 \text{ pulg} \end{aligned}$$

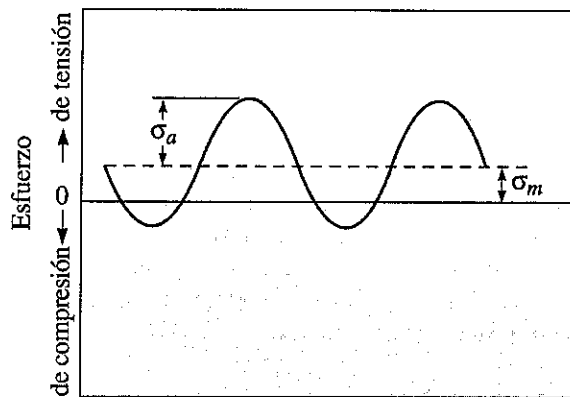
La selección de una flecha más larga reduce el nivel de esfuerzo y hace que la fatiga sea menos probable de ocurrir o retrasa la falla. Por supuesto, otras consideraciones podrían ser importantes. Las altas temperaturas y las condiciones corrosivas son inherentes en la producción de cemento. Si la flecha es calentada o atacada por el ambiente corrosivo, la fatiga se acelera. Por tanto, para aplicaciones que involucran la fatiga de componentes, las inspecciones de los componentes son muy exhaustivas para evitar una falla catastrófica.

7-8**Aplicación de la prueba de fatiga**

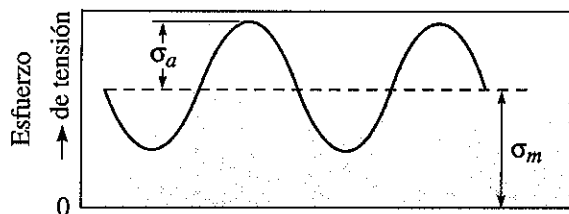
Los componentes con frecuencia son sujetos a condiciones de carga que no dan esfuerzos iguales en tensión y en compresión (figura 7-20). Por ejemplo, el esfuerzo máximo durante la compresión puede ser menor que el esfuerzo de tensión máximo. En otros casos, la carga



a)



b)



c)

Figura 7-20

Ejemplos de ciclos de esfuerzo.

a) Esfuerzo igual en tensión y en compresión, b) esfuerzo de tensión mayor que el esfuerzo de compresión y c) todo el esfuerzo es de tensión.

puede estar entre un esfuerzo de tensión máximo y uno mínimo; aquí la curva S-N se presenta como la amplitud del esfuerzo en función del número de ciclos a la falla. La *amplitud del esfuerzo* (σ_a) se define como la mitad de la diferencia entre los esfuerzos máximo y mínimo y el *esfuerzo medio* (σ_m) se define como el promedio entre los esfuerzos máximo y mínimo:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}}{2} \quad (7-15)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}}{2} \quad (7-16)$$

Un esfuerzo de compresión se considera un esfuerzo “negativo”. Por tanto, si el esfuerzo de tensión máximo es de 50 000 psi y el esfuerzo mínimo es un esfuerzo de compresión de 10 000 psi, utilizando las ecuaciones 7-15 y 7-16, la amplitud del esfuerzo es de 30 000 psi y el esfuerzo medio es de 20 000 psi.

A medida que aumenta el esfuerzo medio, la amplitud del esfuerzo debe disminuir para que el material soporte los esfuerzos aplicados. La condición puede resumirse por medio de la relación de Goodman:

$$\sigma_a = \sigma_{fs} \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{RTE}} \right) \right] \quad (7-17)$$

donde σ_{fs} es la resistencia a la fatiga deseada para el esfuerzo medio de cero y σ_{RTE} es la resistencia a la tensión del material. Por tanto, en una prueba de fatiga con viga rotatoria en voladizo, donde el esfuerzo medio es cero, puede tolerarse sin fatiga una amplitud del esfuerzo relativamente grande. Sin embargo, si el ala de un avión se carga cerca de su resistencia a la fluencia, las vibraciones de incluso una amplitud pequeña pueden ocasionar que inicie y crezca una grieta por fatiga.

Rapidez de crecimiento de una grieta En muchos casos, un componente puede no estar en riesgo de falla aun cuando se presente una grieta. Para calcular cuándo podría ocurrir la falla, la rapidez o velocidad de propagación de una grieta se vuelve importante. La figura 7-21 muestra la rapidez de crecimiento de una grieta en función del intervalo del factor de intensidad del esfuerzo ΔK , el cual caracteriza la geometría de la grieta y la amplitud del esfuerzo. Debajo del umbral del ΔK , una grieta no crece; para intensidades del esfuerzo ligeramente mayores, las grietas crecen con lentitud; y a intensidades del esfuerzo aun mayores, una grieta crece a una rapidez dada por

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (7-18)$$

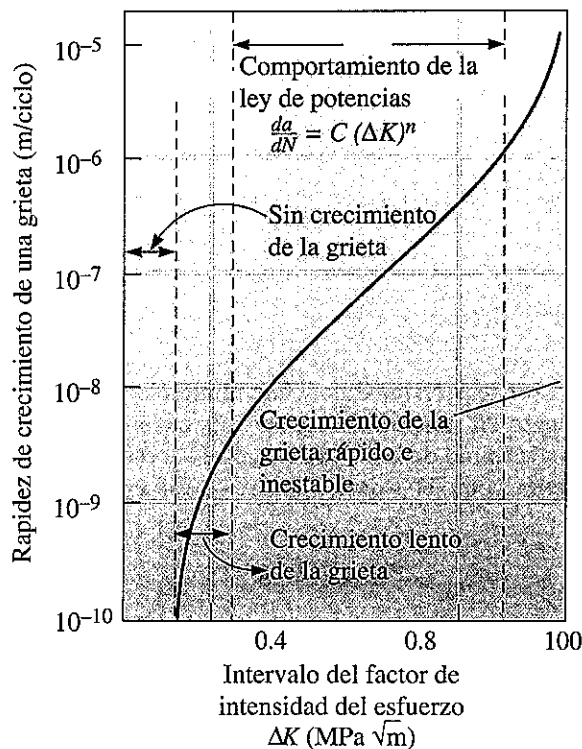


Figura 7-21

Rapidez de crecimiento de una grieta en función del intervalo del factor de intensidad del esfuerzo para un acero de alta resistencia. Para este acero, $C = 1.62 \times 10^{-12}$ y $n = 3.2$ para las unidades mostradas.

En esta ecuación, C y n son constantes empíricas que dependen del material. Por último, cuando ΔK es aún mayor, las grietas crecen de manera rápida e inestable hasta que ocurre la fractura.

La rapidez de crecimiento de una grieta se incrementa a medida que la grieta aumenta de tamaño, como se predice a partir del factor de intensidad del esfuerzo (ecuación 7-1):

$$\Delta K = K_{\text{máx}} - K_{\text{mín}} = f\sigma_{\text{máx}}\sqrt{\pi a} - f\sigma_{\text{mín}}\sqrt{\pi a} = f\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (7-19)$$

Si el esfuerzo cíclico $\Delta\sigma(\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}})$ no cambia, entonces la longitud de la grieta a aumenta, ΔK y la rapidez de crecimiento de una grieta da/dN aumentan. Al utilizar esta expresión, debe observarse que una grieta no se propagará durante la compresión. Por tanto, si $\sigma_{\text{mín}}$ es de compresión, o menor a cero, entonces $\sigma_{\text{mín}}$ debe establecerse igual a cero.

Conocer la rapidez de crecimiento de una grieta es de ayuda en el diseño de componentes y en la evaluación no destructiva para determinar si una grieta posee riesgo inminente para la estructura. Una aproximación para este problema es calcular el número de ciclos requeridos antes de que ocurra la falla. Reacomodando la ecuación 7-18 y sustituyendo ΔK :

$$dN = \frac{da}{Cf^n \Delta\sigma^n \pi^{n/2} a^{n/2}}$$

Si se integra esta expresión entre el tamaño inicial de una grieta y el tamaño de la grieta requerido para que ocurra la fractura, se encuentra que

$$N = \frac{2[(a_c)^{(2-n)/2} - (a_i)^{(2-n)/2}]}{(2-n)Cf^n \Delta\sigma^n \pi^{n/2}} \quad (7-20)$$

donde a_i es el tamaño inicial de la imperfección y a_c es el tamaño de la imperfección requerido para la fractura. Si se conocen las constantes n y C en la ecuación 7-18 para el material, se puede calcular el número de ciclos requeridos a la falla para un esfuerzo cíclico dado (ejemplo 7-12).

Ejemplo 7-12

Diseño de una placa resistente a la fatiga

Una placa de acero de alta resistencia (figura 7-21), la cual tiene una tenacidad a la fractura en estado de deformación plana de $80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ se carga de manera alterna en tensión a 500 MPa y una compresión a 60 MPa. La placa debe sobrevivir 10 años, con el esfuerzo aplicado a una frecuencia de una vez cada 5 minutos. Diseñe un procedimiento de fabricación y de prueba que asegure que el componente servirá como se pretende. Suponga un factor de geométrico $f = 1.0$ para todas las imperfecciones.

SOLUCIÓN

Para diseñar la capacidad de fabricación y prueba, debe determinarse el tamaño máximo de las imperfecciones que podría conducir a la falla dentro del periodo de 10 años. El tamaño de la grieta crítico utilizando la tenacidad a la fractura y el esfuerzo máximo es

$$\begin{aligned} K_{Ic} &= f\sigma\sqrt{\pi a_c} \\ 80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} &= (1.0)(500 \text{ MPa})\sqrt{\pi a_c} \\ a_c &= 0.0081 \text{ m} = 8.1 \text{ mm} \end{aligned}$$

El esfuerzo máximo es de 500 MPa; sin embargo, el esfuerzo mínimo es cero, no 60 MPa en compresión, debido a que las grietas no se propagan en compresión. Por tanto, $\Delta\sigma$ es

$$\Delta\sigma = \sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}} = 500 - 0 = 500 \text{ MPa}$$

Se necesita determinar el número mínimo de ciclos que la placa debe soportar:

$$N = (1 \text{ ciclo}/5 \text{ min})(60 \text{ min}/h)(24 \text{ h}/d)(365 \text{ d}/a)(10 \text{ a})$$

$$N = 1\,051\,200 \text{ ciclos}$$

Si se supone que $f = 1.0$ para todas las longitudes de las grietas y al observar que $C = 1.62 \times 10^{-12}$ y $n = 3.2$ a partir de la figura 7-21 y la ecuación 7-20, entonces

$$1\,051\,200 = \frac{2[(0.008)^{(2-3.2)/2} - (a_i)^{(2-3.2)/2}]}{(2-3.2)(1.62 \times 10^{-12})(1)^{3.2}(500)^{3.2}\pi^{3.2/2}}$$

$$1\,051\,200 = \frac{2[18 - a_i^{0.6}]}{(-1.2)(1.62 \times 10^{-12})(1)(4.332 \times 10^8)(6.244)}$$

$$a_i^{-0.6} = 18 + 2764 = 2782$$

$$a_i = 1.82 \times 10^{-6} \text{ m} = 0.00182 \text{ mm para las imperfecciones en la superficie}$$

$$2a_i = 0.00364 \text{ mm para las imperfecciones internas}$$

El proceso de fabricación debe producir imperfecciones en la superficie menores a 0.00182 mm de longitud. Además, las pruebas no destructivas deben ser capaces de asegurar que no se presenten grietas que se aproximen a esta longitud.

Efectos de la temperatura A medida que aumenta la temperatura del material, la vida de fatiga y el límite de resistencia a la fatiga disminuyen. Además, un cambio de temperatura cíclico propicia la falla por fatiga térmica; cuando un material se calienta de una manera no uniforme, algunas partes de la estructura se expanden más que otras. Esta expansión no uniforme introduce un esfuerzo dentro del material y cuando la estructura se enfría y se contrae posteriormente, se imponen los esfuerzos del signo opuesto. Como consecuencia de los esfuerzos y deformación inducidos de manera térmica, con el tiempo puede ocurrir la fatiga. La frecuencia con la que se aplica el esfuerzo también influye en el comportamiento de la fatiga. En particular, los esfuerzos de alta frecuencia pueden ocasionar que los materiales poliméricos se calienten; al aumentar las temperaturas, los polímeros fallan de manera más rápida. También deben considerarse los efectos químicos de la temperatura (por ejemplo, la oxidación).

7-9 Termofluencia, ruptura por esfuerzo y corrosión por esfuerzo

Si se aplica un esfuerzo a un material a una temperatura elevada, el material puede estirarse y con el tiempo fallar, aun cuando el esfuerzo aplicado sea *menor* que la resistencia a la fluencia a esa temperatura. A la deformación permanente dependiente del tiempo bajo una carga constante o un esfuerzo constante y a temperaturas altas se le conoce como **termofluencia**. Un gran número de fallas que ocurren en los componentes utilizados a altas temperaturas puede atribuirse a la termofluencia o a una combinación de termofluencia y fatiga. La difusión, el deslizamiento o ascenso de las dislocaciones o el deslizamiento de los límites de granos pueden contribuir a la termofluencia de los materiales metálicos. Los materiales poliméricos también muestran termofluencia. En los metales y aleaciones dúctiles sujetos a la termofluencia, la fractura es acompañada por rebajos, nucleación (formación de núcleos) y coalescencia o deslizamiento de los límites de los granos.

Un material se considera que falla por termofluencia incluso si aun *no* se ha fracturado. Cuando un material fluye y al final se rompe, la fractura se define como *ruptura por esfuerzo*. Por lo regular, las fracturas dúctiles de ruptura por esfuerzo incluyen rebajo y la presencia de muchas grietas que no tuvieron la oportunidad de producir la fractura final. Además, los granos cerca de la superficie de la fractura tienden a prolongarse. Las fallas dúctiles de ruptura por esfuerzo por lo general ocurren a rapidez de fluencia alta y a temperaturas de exposición relativamente bajas y tienen tiempos de ruptura cortos. Las fallas frágiles de ruptura por esfuerzo quebradizas muestran poco rebajo y ocurren con más frecuencia a rapideces de fluencia menores y a temperaturas altas. Se observan granos equiaxiales cerca de la superficie de la fractura. La falla quebradiza por lo regular ocurre por la formación de vacíos en la intersección de tres límites de los granos y la precipitación de vacíos adicionales a lo largo de los límites de los granos por el proceso de difusión (figura 7-22).

Corrosión bajo esfuerzo Este tipo de corrosión es un fenómeno en el que los materiales reaccionan con las sustancias químicas corrosivas en el ambiente. Esto conduce a la formación de grietas y a la disminución de la resistencia. La corrosión bajo esfuerzo puede ocurrir a esfuerzos muy por debajo de la resistencia a la fluencia del material metálico, cerámico o vítreo debido al ataque por un medio corrosivo. En los materiales metálicos se producen grietas por corrosión profundas y finas, aun cuando el metal como un todo muestre poco ataque uniforme. Los esfuerzos pueden ser aplicados de manera externa o esfuerzos residuales almacenados. Las fallas de corrosión bajo esfuerzos con frecuencia se identifican por medio del examen microestructural del metal circundante. Por lo regular, se observa la ramificación extensiva de las grietas a lo largo de los límites de los granos (figura 7-23). La localización a la que las grietas inician puede identificarse por medio de la presencia de un producto de corrosión.

Los vidrios inorgánicos de silicato son especialmente propensos a fallar por la reacción con vapor de agua. Es bien conocido que la resistencia de las fibras de sílice o de los productos de vidrio de sílice es muy alta cuando estos materiales se protegen del vapor de agua. A medida que los componentes de las fibras o del vidrio de sílice se exponen al vapor de agua, comienzan las reacciones de corrosión que conducen a la formación de fisuras en la superficie, lo cual ocasiona por último que las grietas crezcan cuando se aplica un esfuerzo. Como se explicó en el capítulo 5, se aplican recubrimientos poliméricos a las fibras ópticas a fin de prevenir que reaccionen con el vapor de agua. Para los vidrios voluminosos, se utilizan tratamientos térmicos especiales como el templado. El **templado** produce un esfuerzo de compresión total sobre la superficie del vidrio. Por tanto, aun si la superficie del vidrio reacciona con el vapor de agua las grietas no crecen dado que el esfuerzo total en la superficie es compresivo. Si se creara una imperfección que penetrará la región de esfuerzo compresivo sobre la superficie, el vidrio templado se haría pedazos. El vidrio templado se utiliza de manera amplia en las aplicaciones de construcción y automotrices.

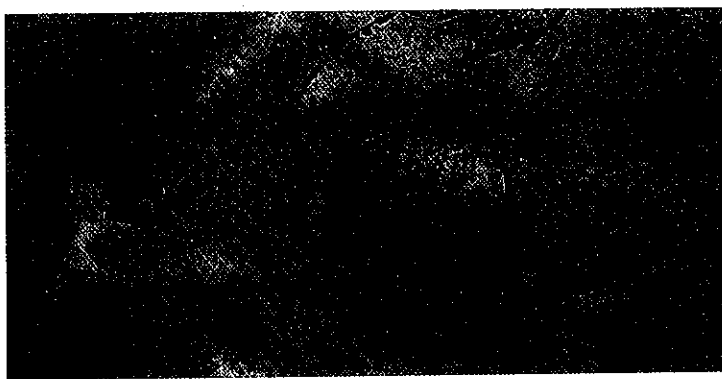
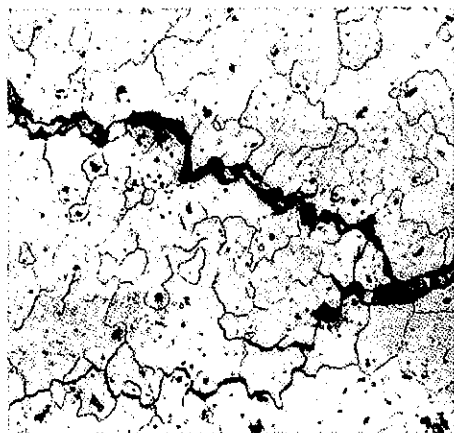


Figura 7-22 Cavidades de termofluencia formadas en los límites de granos en un acero inoxidable austenítico (500×). (De ASM Handbook, vol. 7, *Metallography and Microstructure* (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073.)

**Figura 7-23**

Micrografía de un metal cerca de una fractura por corrosión bajo esfuerzo, que muestra las muchas grietas intergranulares formadas como resultado del proceso de corrosión (200×).

(De ASM Handbook, vol. 7, *Metallography and Microstructure* (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073.)

Ejemplo 7-13 *Análisis de la falla de un tubo*

Se encuentra que un tubo de titanio utilizado para transportar un material corrosivo a 400 °C falla después de varios meses. ¿Cómo determinaría la causa de la falla?

SOLUCIÓN

Dado que se requirió cierto tiempo a una temperatura alta antes de que ocurriera la falla, primero podría sospecharse de un mecanismo de termofluencia o de corrosión bajo esfuerzo para la falla. Sería aconsejable el examen microscópico del material cerca de la superficie de la fractura. Si se observan muchas grietas pequeñas ramificadas que se alejan de la superficie, la corrosión bajo esfuerzo es una gran posibilidad. Si los granos cerca de la superficie de la fractura están alargados, con muchos vacíos entre los granos, lo más probable es que la termofluencia sea la culpable.

7-10 Evaluación del comportamiento de la termofluencia

Para determinar las características de la termofluencia de un material, se aplica un esfuerzo constante a un espécimen calentado en una **prueba de termofluencia**. Tan pronto como se aplica el esfuerzo, el espécimen se estira de manera elástica una pequeña cantidad ϵ_0 (figura 7-24), que depende del esfuerzo aplicado y del módulo de elasticidad del material a la temperatura alta. La prueba de termofluencia también puede llevarse a cabo bajo una carga constante y es importante desde el punto de vista del diseño de ingeniería.

Ascenso de las dislocaciones Las altas temperaturas permiten que las dislocaciones en un material metálico **asciendan**. En la ascensión, los átomos se mueven hacia o desde la línea de dislocaciones por difusión, lo que ocasiona que la dislocación se mueva en una dirección que es perpendicular, no paralela, al plano de deslizamiento (figura 7-25). La dislocación escapa de las imperfecciones de red, continúa deslizándose y ocasiona una deformación adicional del espécimen incluso a esfuerzos aplicados bajos.

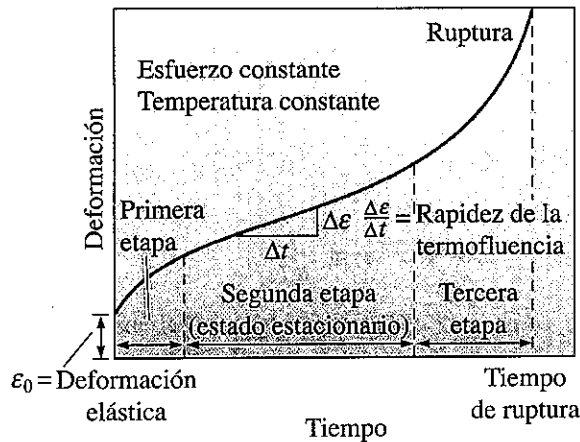


Figura 7-24

Curva de termofluencia común que muestra la deformación producida como una función del tiempo para un esfuerzo y una temperatura constantes.

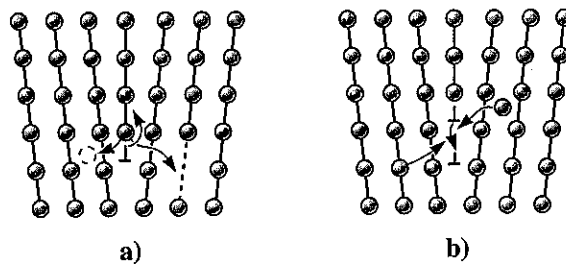


Figura 7-25

Las dislocaciones pueden ascender a) cuando los átomos dejan la línea de dislocaciones para crear intersticios o para llenar vacancias o b) cuando los átomos se unen a la línea de dislocaciones creando vacancias o eliminando intersticios.

Tiempos de la rapidez de termofluencia lenta y de ruptura

Durante la prueba de termofluencia, la deformación o elongación se mide como una función del tiempo y se grafica para obtener la curva de termofluencia (figura 7-24). En la primera etapa de la termofluencia de los metales, muchas dislocaciones ascienden alejándose de los obstáculos, se deslizan y contribuyen a la deformación. Con el tiempo, la rapidez a la que las dislocaciones ascienden alejándose de los obstáculos es igual a la rapidez a la que las dislocaciones son bloqueadas por otras imperfecciones. Esto conduce a una segunda etapa, o estado estacionario, de la termofluencia. La pendiente de la porción del estado estacionario de la curva de termofluencia es la **rapidez de termofluencia**:

$$\text{Rapidez de termofluencia} = \frac{\Delta \text{deformación}}{\Delta \text{tiempo}} \quad (7-21)$$

Con el tiempo, durante la tercera etapa de la termofluencia, comienza el rebajo, aumenta el esfuerzo y el espécimen se deforma a una rapidez acelerada hasta que ocurre la falla. El tiempo requerido para que ocurra la falla es el **tiempo de ruptura**. Un esfuerzo mayor o una temperatura más alta reducen el tiempo de ruptura y aumentan la rapidez de termofluencia (figura 7-26).

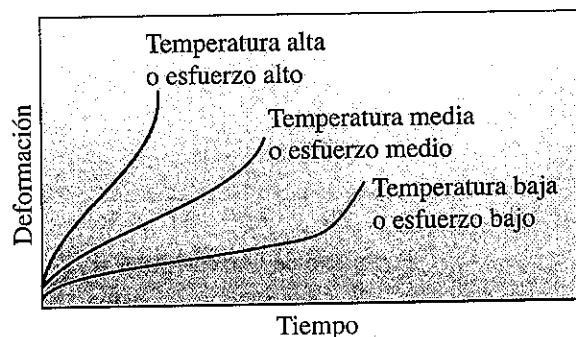


Figura 7-26

Efecto de la temperatura o del esfuerzo aplicado sobre la curva de termofluencia.

A la rapidez de termofluencia y el tiempo de ruptura (t_r) le siguen una relación de Arrhenius que toma en cuenta la influencia combinada del esfuerzo y la temperatura aplicados:

$$\text{Rapidez de termofluencia} = C\sigma^n \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \quad (7-22)$$

$$t_r = K\sigma^m \exp\left(\frac{Q_r}{RT}\right), \quad (7-23)$$

donde R es la constante de los gases, T es la temperatura en kelvins, C , K , n y m son constantes para el material. Q_c es la energía de activación para la termofluencia y Q_r es la energía de activación para la ruptura. En particular, Q_c está relacionada con la energía de activación para la autodifusión cuando el ascenso de las dislocaciones es importante.

En las cerámicas cristalinas, otros factores —incluyendo el deslizamiento de los límites de los granos y la formación de núcleos de microgrietas— son particularmente importantes. Con frecuencia, un material no cristalino o vítreo está presente en los límites de los granos; la energía de activación requerida para que el vidrio se deforme es baja, lo que conduce a rapidezces de termofluencia altas en comparación con las cerámicas totalmente cristalinas. Por la misma razón, la termofluencia ocurre a una velocidad rápida en los vidrios cerámicos y en los polímeros amorfos.

7-11 Uso de datos de la termofluencia

Las **curvas de esfuerzo-ruptura**, mostradas en la figura 7-27a), calculan el tiempo de vida esperado de un componente para una combinación particular de esfuerzo y temperatura. El **parámetro de Larson-Miller**, ilustrado en la figura 7-27b), se utiliza para consolidar la relación esfuerzo-temperatura-tiempo de ruptura en una sola curva. El parámetro de Larson-Miller ($L.M.$) es

$$L.M. = \left(\frac{T}{1000}\right)(A + B \ln t) \quad (7-24)$$

donde T está en kelvins, t es el tiempo en horas y A y B son constantes para el material.

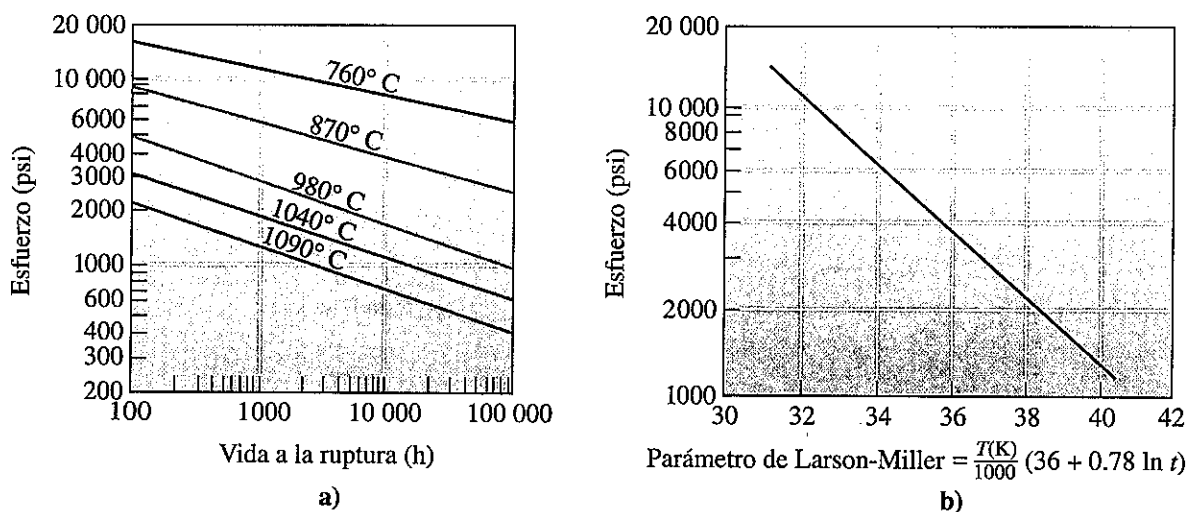
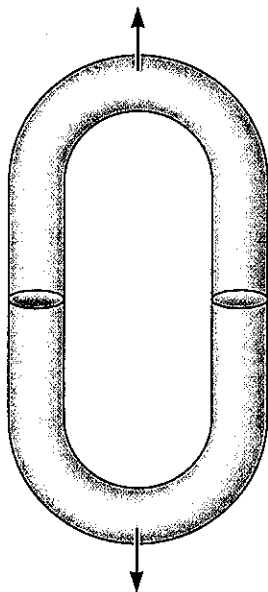


Figura 7-27 Resultados de una serie de pruebas de termofluencia. a) Curvas de esfuerzo-ruptura para una aleación de hierro-cromo-níquel y b) el parámetro de Larson-Miller para el hierro colado dúctil.

Ejemplo 7-14*Diseño de un banco para una cadena*

Diseñe una cadena de hierro colado dúctil (figura 7-28) para operar en un horno utilizado para la cocción de ladrillos cerámicos. La cadena se utilizará por cinco años a 600 °C con una carga aplicada de 5000 lb.

**Figura 7-28**

Esquema del eslabón de una cadena (para el ejemplo 7-14).

SOLUCIÓN

A partir de la figura 7-27b), el parámetro de Larson-Miller para el hierro colado dúctil es

$$L.M. = \frac{T(36 + 0.78 \ln t)}{1000}$$

La cadena debe sobrevivir cinco años o

$$t = (24 \text{ h/d})(365 \text{ d/a})(5 \text{ a}) = 43\,800 \text{ h}$$

$$L.M. = \frac{(600 + 273)[36 + 0.78 \ln(43\,800)]}{1000} = 38.7$$

A partir de la figura 7-27b), el esfuerzo aplicado no debe ser mayor que 1800 psi.

Si supone un **factor de seguridad** de 2, esto significará que el esfuerzo aplicado no debe ser mayor que $1800/2 = 900$ psi.

El área total de la sección transversal de la cadena requerida para soportar la carga de 5000 lb es

$$A = F/\sigma = \frac{5000 \text{ lb}}{900 \text{ psi}} = 5.56 \text{ pulg}^2$$

El área de la sección transversal de cada "mitad" del eslabón de hierro es entonces de 2.78 pulg² y suponiendo una sección transversal circular:

$$d^2 = (4/\pi)A = (4/\pi)(2.78) = 3.54$$

$$d = 1.88 \text{ pulg}$$

Resumen

- La tenacidad se refiere a la habilidad de los materiales para absorber energía antes de que se fracturen. La tenacidad a la tensión es igual al área bajo la curva esfuerzo verdadero-deformación verdadera. La tenacidad al impacto se mide utilizando la prueba de impacto. Ésta podría ser muy diferente de la de la tenacidad a la tensión. La tenacidad a la fractura describe qué tan fácil se propaga una grieta o una imperfección en un material. La tenacidad a la fractura en estado de deformación plana K_{Ic} es un resultado común de estas pruebas.
- Se utiliza la estadística de Weibull para describir y caracterizar la variabilidad en la resistencia de los materiales quebradizos. El módulo de Weibull es una medida de la variabilidad de la resistencia de un material.
- La prueba de fatiga permite comprender cómo se comporta un material cuando se le aplica un esfuerzo cíclico. El conocimiento de la rapidez de crecimiento de una grieta puede ayudar a determinar la vida de fatiga.
- El análisis microestructural de las superficies de la fractura puede conducir a comprensiones mejores del origen y la causa de la fractura. Distintas características microestructurales están asociadas con la fractura dúctil y quebradiza al igual que con la falla por fatiga.
- La prueba de termofluencia provee información sobre la habilidad de soporte de carga de un material a altas temperaturas. La rapidez de termofluencia y el tiempo de ruptura son propiedades importantes obtenidas a partir de estas pruebas.

Glosario

Ascenso Movimiento de una dislocación perpendicular a su plano de deslizamiento por la difusión de átomos hacia o desde la línea de dislocaciones.

Corrosión bajo esfuerzo Fenómeno en el que los materiales reaccionan con las sustancias químicas corrosivas en el ambiente, lo que conduce a la formación de grietas y a la disminución de la resistencia.

Curva de esfuerzo-ruptura Método para reportar los resultados de una serie de pruebas de termofluencia graficando el esfuerzo aplicado en función del tiempo de ruptura.

Curva de Wöhler Véase Curva S-N.

Curva S-N (también conocida como curva de Wöhler) Gráfica que muestra la relación entre el esfuerzo aplicado y el número de ciclos a la falla por fatiga.

Delaminación Proceso por medio del cual comienzan a separarse las distintas capas en un compuesto.

Distribución de Weibull Distribución matemática que muestra la probabilidad de falla o de supervivencia de un material como una función del esfuerzo.

Estriaciones Patrones observados en la superficie fracturada de una muestra fatigada. Son visibles a una escala mucho más fina que las marcas de playa y muestran la posición de la punta de la grieta después de cada ciclo.

Factor de seguridad Razón del nivel de esfuerzo para el que se diseña un componente al nivel de esfuerzo real experimentado. Factor empleado para diseñar componentes de soporte de carga. Por ejemplo, la carga máxima a la que se sujeta un componente es de 10 000 psi. Se diseña (es decir, se selecciona el material, la geometría, etc.) de tal manera que pueda soportar 20 000 psi; en este caso, el factor de seguridad es de 2.0.

Fractura concoidal Superficie de la fractura que contiene una zona especular lisa cerca del origen de la fractura con líneas de rasgado que comprimen el resto de la superficie. Ésta es común entre los materiales amorfos.

Granallado Proceso en el que se le disparan esferas metálicas a un componente. Esto conduce a un esfuerzo de compresión residual en la superficie de un componente e incrementa la vida de fatiga.

Imperfección de Griffith Grieta o imperfección en un material que concentra y magnifica el esfuerzo aplicado.

Intergranular Entre los granos o a lo largo de los límites de granos.

Límite de resistencia a la fatiga Concepto antiguo que definía un esfuerzo debajo del cual un material no fallaría en una prueba de fatiga. Los factores como la corrosión o la sobrecarga ocasional pueden provocar que los materiales fallen a esfuerzos debajo del límite de resistencia supuesto.

Marcas de playa o de almeja Patrones observados con frecuencia en un componente sujeto a la fatiga. Por lo general se forman cuando se cambia la carga durante el servicio o cuando la carga es intermitente, quizás permitiendo el tiempo para la oxidación interna de la grieta.

Mecánica de la fractura Estudio de la habilidad de un material para soportar un esfuerzo en la presencia de una imperfección.

Microvacíos Desarrollo de pequeños orificios en un material. Se forman cuando un esfuerzo alto ocasiona la separación del metal en los límites de los granos o en las interfaces entre el metal y las inclusiones.

Módulo de Weibull (m) Parámetro relacionado con la distribución de Weibull. Es un indicador de la variabilidad de la resistencia de los materiales que resulta de una distribución de los tamaños de las imperfecciones.

Parámetro de Larson-Miller Parámetro utilizado para relacionar el esfuerzo, la temperatura y el tiempo de ruptura en la termofluencia.

Patrón en forma de V (Chevron) Característica de fractura común producida por los frentes separados de grietas que se propagan a diferentes niveles en el material.

Prueba con viga rotatoria en voladizo Un método para la prueba de fatiga.

Prueba de fatiga Mide la resistencia de un material a la falla cuando se aplica de manera repetida un esfuerzo debajo de la resistencia a la fluencia.

Prueba de termofluencia Mide la resistencia de un material a la deformación y falla cuando se sujeta a una carga estática debajo de la resistencia a la fluencia a una temperatura elevada.

Rapidez de termofluencia Rapidez a la que un material se deforma cuando se le aplica un esfuerzo a una temperatura alta.

Razón de resistencia a la fatiga Límite de resistencia dividido entre la resistencia a la tensión del material. La razón es alrededor de 0.5 para muchos metales ferrosos. Véase la nota de advertencia acerca del límite de resistencia a la fatiga.

Resistencia a la fatiga Esfuerzo requerido para ocasionar la falla por fatiga a un número dado de ciclos, como 500 millones de ciclos.

Sensibilidad a la muesca Mide el efecto de una muesca, rayadura u otra imperfección sobre las propiedades del material, como la tenacidad o la vida de fatiga.

Templado Medida cualitativa de la energía requerida para ocasionar la fractura de un material. Se dice que un material que resiste la falla por impacto es tenaz. Una medida de la tenacidad es el área bajo la curva de esfuerzo verdadero-deformación verdadera (tenacidad a la tensión); otra es la energía de impacto medida durante una prueba de impacto (tenacidad al impacto). La habilidad de los materiales que contienen imperfecciones para soportar una carga se conoce como tenacidad a la fractura.

Templadura Tratamiento térmico para vidrios que hace más seguro al vidrio; lo hace creando una capa de esfuerzo compresiva en la superficie.

Tenacidad a la fractura Resistencia de un material a fallar en la presencia de una imperfección.

Termofluencia Deformación permanente dependiente del tiempo a altas temperaturas, que ocurre a una carga constante o a un esfuerzo constante.

Tiempo de ruptura Tiempo requerido para que falle un espécimen por termofluencia a una temperatura y un esfuerzo particulares.

Transgranular Significa a través de los granos (por ejemplo, una fractura transgranular sería la fractura en la que las grietas pasarían a través de los granos).

Vida de fatiga Número de ciclos permitidos a un esfuerzo en particular antes de que un material falle por fatiga.

Problemas

Sección 7-1 Mecánica de la fractura

Sección 7-2 Importancia de la mecánica de la fractura

- 7-1** La alúmina (Al_2O_3) es una cerámica quebradiza con tenacidad baja. Suponga que pudieran insertarse dentro de la alúmina fibras de carburo de silicio SiC , otra cerámica quebradiza con tenacidad baja. ¿Al hacer esto se afectaría la tenacidad del compuesto con matriz cerámica? Explique.
- 7-2** Un compuesto con matriz cerámica contiene imperfecciones internas tan largas como 0.001 cm de longitud. La tenacidad a la fractura en estado de deformación plana del compuesto es de $45 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ y la resistencia a la tensión es de 550 MPa. ¿El esfuerzo ocasionará que el compuesto falle antes de que se alcance la resistencia a la tensión? Suponga que $f = 1$.
- 7-3** Una aleación de aluminio que tiene una tenacidad a la fractura en estado de deformación plana de 25 000 psi $\sqrt{\text{pulg}}$ falla cuando se le aplica un esfuerzo de 42 000 psi. La observación de la superficie de la fractura indica que ésta comenzó en la superficie de la pieza. Calcule el tamaño de la imperfección que inició la fractura. Suponga que $f = 1.1$.
- 7-4** Un polímero que contiene imperfecciones internas de 1 mm de longitud falla a un esfuerzo de 25 MPa. Determine la tenacidad a la fractura en estado de deformación plana del polímero. Suponga que $f = 1$.
- 7-5** Una pieza cerámica para el motor de un jet tiene una resistencia a la fluencia de 75 000 psi y una tenacidad a la fractura en estado de deformación plana de 5000 psi $\sqrt{\text{pulg}}$. Para asegurarse que de la pieza no falle, se planea asegurar que el esfuerzo máximo aplicado sea de sólo un tercio de la resistencia a la fluencia. Se utiliza una prueba no destructiva que detectará cualquier imperfección interna mayor a 0.05 pulg de largo. Suponiendo que $f = 1.4$, ¿esta prueba no destructiva posee la sensibilidad requerida? Explique.
- 7-6** Un proceso de fabricación que de manera no intencionada introduce grietas en la superficie de una pieza se utilizó para producir componentes de soporte de carga. El diseño requiere que el componente sea capaz de soportar un esfuerzo de 450 MPa. El componente falló de manera catastrófica en el servicio.

Usted es ingeniero de análisis de fallas que debe determinar si el componente falló debido a una sobrecarga en el servicio o por las imperfecciones del proceso de fabricación. El fabricante asegura que el componente se pulió para eliminar las grietas y se inspeccionó para asegurar que las grietas en la superficie no fuesen mayores a 0.5 mm. El fabricante cree que el componente falló debido a un error del operador.

Se ha verificado de manera independiente que la pieza de 5 cm de diámetro fue sujeta a una carga de tensión de 1 MN (10^6 N).

El material a partir del cual se fabricó el componente tiene una tenacidad a la fractura de $75 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ y una resistencia a la tensión última de 600 MPa. Suponga grietas externas para las que $f = 1.12$.

- ¿De quién es la culpa de que el componente fallara, del fabricante o del operador? Muestre su trabajo para ambos casos.
- Además del análisis que presentó en a), ¿qué características podría buscar en las superficies de la fractura que soporten su conclusión?

- 7-7** Explique cómo puede obtenerse la tenacidad a la fractura de las cerámicas utilizando la prueba de dureza. Explique por qué tal método provee mediciones cualitativas.

Sección 7-3 Características microestructurales de fractura en materiales metálicos

Sección 7-4 Características microestructurales de fractura en cerámicas, vidrios y compuestos

- 7-8** Explique los términos fracturas intergranular e intragranular. Utilice un esquema que muestre los granos, sus límites y una trayectoria de la grieta que sea común de la fractura intergranular e intragranular en los materiales.
- 7-9** ¿Cuáles son las características microestructurales distintivas asociadas con la fractura dúctil?
- 7-10** ¿Cuáles son las características microestructurales distintivas asociadas con una fractura quebradiza en un material metálico?

- 7-11** ¿Qué materiales muestran por lo general una fractura concooidal?
- 7-12** Describa de manera breve cómo pueden fallar los materiales compuestos reforzados con fibras.
- 7-13** El concreto tiene una resistencia excepcional en compresión, pero falla con bastante facilidad en tensión. Explique por qué.
- 7-14** ¿Qué controla la resistencia de los vidrios? ¿Qué puede realizarse para incrementar la resistencia de los vidrios de silicato?

Sección 7-5 Estadística de Weibull para el análisis de la resistencia a la falla

- 7-15** Trace un esquema de la resistencia de las cerámicas y la de los metales y aleaciones como una función de la probabilidad de falla. Explique las diferencias que anticipe.
- 7-16** ¿Por qué la resistencia de las cerámicas varía de manera considerable con el tamaño de los componentes de la cerámica?
- 7-17** ¿Qué parámetro indica acerca de la variabilidad de la resistencia de las cerámicas y los vidrios?
- 7-18** ¿Por qué las fibras de vidrio de distintas longitudes tienen resistencias diferentes?
- 7-19** Explique la importancia de la distribución de Weibull.
- 7-20*** Turbochargers Are Us, una nueva compañía, lo contrata para diseñar su nuevo turbocompresor. Le explican que desean reemplazar su turbocompresor de superaleación metálica con una cerámica de alta tecnología que es mucho más ligera para la misma configuración. El nitruro de silicio puede ser una buena elección y le pide a Ceramic Turbochargers, Inc. que le suministre barras hechas a partir de un cierto grado de Si_3N_4 . Le envían 25 barras que rompe en una flexión en tres puntos, utilizando una longitud de soporte externa de 40 mm y una longitud de carga interna de 20 mm, obteniendo la información en la siguiente tabla.
- Calcule la resistencia a la flexión utilizando $\sigma_f = (1.5 \cdot F \cdot S)/(t^2 \cdot w)$, donde F = carga, S = longitud de soporte (longitud de carga $a = 40$ mm y $b = 20$ mm en este caso), t = grosor y w = ancho y dé la

Barra	Ancho (mm)	Grosor (mm)	Carga (N)
1	6.02	3.99	2510
2	6.00	4.00	2615
3	5.98	3.99	2375
4	5.99	4.04	2865
5	6.00	4.05	2575
6	6.01	4.00	2605
7	6.01	4.01	2810
8	5.95	4.02	2595
9	5.99	3.97	2490
10	5.98	3.96	2650
11	6.05	3.97	2705
12	6.00	4.05	2765
13	6.02	4.00	2680
14	5.98	4.01	2725
15	6.03	3.99	2830
16	5.95	3.98	2730
17	6.04	4.03	2565
18	5.96	4.01	2650
19	5.97	4.05	2650
20	6.02	4.00	2745
21	6.01	4.00	2895
22	6.00	3.99	2525
23	6.00	3.98	2660
24	6.04	3.95	2680
25	6.02	4.05	2640

resistencia media (probabilidad del 50% de falla) y la desviación estándar.

- Trace una gráfica de Weibull ordenando la información de la resistencia más baja a la resistencia más alta. La resistencia más baja se vuelve $n = 1$, después $n = 2$, etc., hasta que $n = N = 25$. Utilice $F = (n - 0.5)/N$ donde n = orden de la resistencia que va de la resistencia más baja $n = 1$ a la resistencia más alta $n = 25$ y $N = 25$. Observe que F es la probabilidad de la falla. Grafique $\ln[1/(1 - F)]$ como una función del $\ln \sigma_f$ y utilice una regresión lineal para encontrar la pendiente de la línea la cual es m : el módulo de Weibull. Encuentre la resistencia característica (σ_0) (probabilidad de 63.2% de falla). (Sugerencia: La resistencia característica se calcula con facilidad fijando $\ln[1/(1 - F)] = 0$ una vez que conoce la ecuación de

la línea. Un programa de hoja de cálculo (como Excel) facilita en gran medida los cálculos).

*El Dr. Raymond Cutler de Ceramatek Inc. contribuyó con este problema.

- 7.21*** Su jefe le pide que calcule el esfuerzo de diseño para una barra de níquel-aluminuro quebradiza que desea utilizar en un diseño a temperatura alta donde el componente cilíndrico se esfuerza en tensión. Usted decide probar barras del mismo diámetro y longitud como diseño en tensión para evitar la corrección del área efectiva (o volumen efectivo en este caso). Mide un esfuerzo promedio de 673 MPa y un módulo de Weibull (m) de 14.7 para las barras de níquel-aluminuro. ¿Cuál es el esfuerzo de diseño en MPa si 99.999% de las piezas que construya deben soportar este esfuerzo sin fracturarse? (Nota: El esfuerzo de diseño es el esfuerzo que elige como ingeniero para que el componente funcione como usted desea.)

*El Dr. Raymond Cutler de Ceramatek Inc. contribuyó con este problema.

Sección 7-6 Fatiga

Sección 7-7 Resultados de la prueba de fatiga

Sección 7-8 Aplicación de la prueba de fatiga

- 7-22** Un espécimen de acero para herramienta cilíndrico de 6 pulg de largo y de 0.25 pulg de diámetro gira como una viga en voladizo y se diseña de tal manera que nunca ocurra su falla. Suponiendo que los esfuerzos de tensión y com-

presión máximos son iguales, determine la carga máxima que puede aplicarse al extremo de la viga. (Véase la figura 7-19.)

- 7-23** Se espera que una barra de 2 cm de diámetro y 20 cm de largo de un polímero de acetal (figura 7-29) que se carga en un extremo sobreviva un millón de ciclos de carga, con esfuerzos de tensión y compresión iguales, durante su tiempo de vida. ¿Cuál es la carga máxima permisible que puede aplicarse?

- 7-24** Se ejerce una carga cíclica de 1500 lb en el extremo de una viga de aluminio de 10 pulg de largo (figura 7-19). La barra debe sobrevivir al menos 10^6 ciclos. ¿Cuál es el diámetro mínimo de la barra?

- 7-25** Una barra cilíndrica de polímero de acetal de 2 cm de largo y 1.5 cm de diámetro se sujeta a una carga vibracional en un extremo de la barra a una frecuencia de 500 vibraciones por minuto, con una carga de 50 N. ¿Cuántas horas sobrevivirá la pieza antes de romperse? (Véase la figura 7-29.)

- 7-26** Suponga que le gustaría producir una pieza a partir del polímero de acetal mostrado en la figura 7-29 para que sobreviva un millón de ciclos en condiciones que proveen esfuerzos de compresión y tensión iguales. ¿Cuál es la resistencia a la fatiga, o amplitud del esfuerzo máximo, requeridas? ¿Cuáles son el esfuerzo máximo, el mínimo y el medio sobre la pieza durante su uso? ¿Qué efecto tendría la frecuencia de la aplicación del esfuerzo en sus respuestas? Explique.

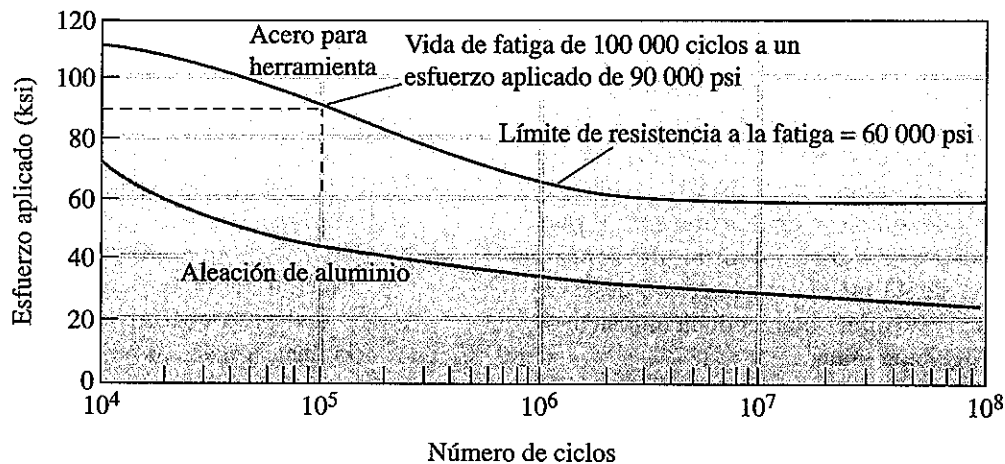


Figura 7-19 (Repetida para los problemas 7-22 y 7-24) Curvas de esfuerzo-número de ciclos para la falla (S-N) para el acero para herramienta y una aleación de aluminio.

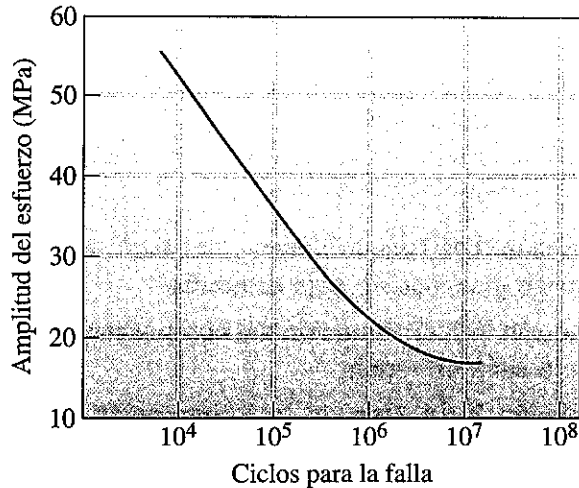


Figura 7-29 Curva de fatiga S-N para un polímero de acetato (para los problemas 7-23, 7-25 y 7-26).

7-27 El acero de alta resistencia en la figura 7-21 se sujeta a un esfuerzo alternante a 200 revoluciones por minuto entre 600 y 200 MPa (ambos

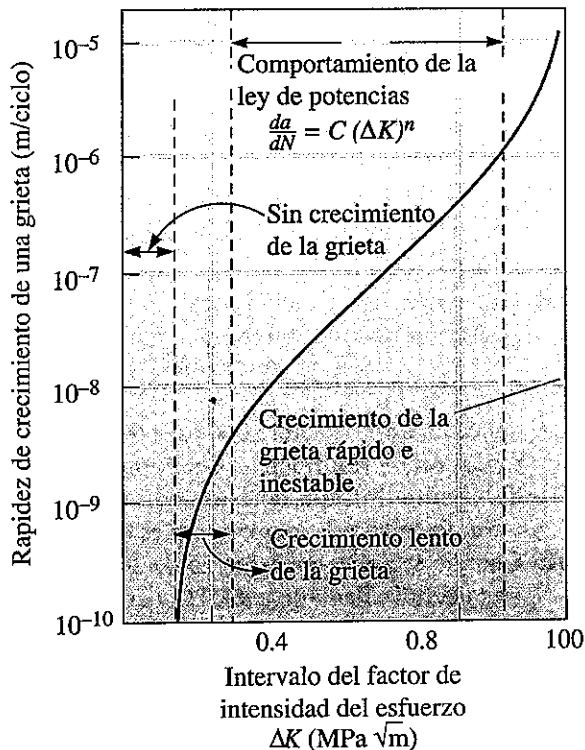


Figura 7-21 (Repetida para los problemas 7-27 y 7-28) Rapidez de crecimiento de una grieta en función del intervalo del factor de intensidad del esfuerzo para un acero de alta resistencia. Para este acero, $C = 1.62 \times 10^{-12}$ y $n = 3.2$ para las unidades mostradas.

en tensión). Calcule la rapidez del crecimiento de una grieta en la superficie cuando alcanza una longitud de 0.2 mm en m/ciclo y m/s. Suponga que $f = 1.0$.

7-28 El acero de alta resistencia en la figura 7-21 el cual tiene una tenacidad a la fractura crítica de $80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, se sujeta a un esfuerzo alternante que varía de -900 MPa (en compresión) a $+900 \text{ MPa}$ (en tensión). Debe sobrevivir 10^5 ciclos antes de que ocurra la falla. Suponga que $f = 1$. Calcule

- el tamaño de una grieta en la superficie requerido para que ocurra la falla y
- el tamaño inicial mayor de una grieta en la superficie que permitirá que esto suceda.

7-29 El fabricante de un producto que se sujeta a ciclos repetitivos ha especificado que el producto debe sustraerse del servicio cuando cualquier grieta alcance el 15% de la longitud crítica de una grieta requerida para ocasionar la fractura.

Considere una grieta que inicialmente es de 0.02 mm de largo en un material con una tenacidad a la fractura de $55 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. El producto se cicla de manera continua entre esfuerzos de compresión y tensión de 300 MPa a una frecuencia constante. Suponga grietas externas para las cuales $f = 1.12$. Las constantes de los materiales para estas unidades son $n = 3.4$ y $C = 2 \times 10^{-11}$.

- ¿Cuál es la longitud crítica de una grieta requerida para ocasionar la fractura?
- ¿Cuántos ciclos ocasionarán que el producto falle?
- Si el producto se sustrae del servicio como especifica el fabricante, ¿cuánto resta de la vida útil del producto?

7-30 Un material que contiene grietas de longitud inicial de 0.010 mm se sujeta a esfuerzos de tensión alternos de 25 y 125 MPa por 350 000 ciclos. El material después se sujeta a esfuerzos de tensión y compresión alternantes de 250 MPa. ¿Cuántos ciclos con la amplitud del esfuerzo más grande pueden soportarse antes de la falla? El material tiene una tenacidad a la fractura de $25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ y las constantes del material de $n = 3.1$ y $C = 1.8 \times 10^{-10}$ para estas unidades. Suponga $f = 1.0$ para todas las grietas.

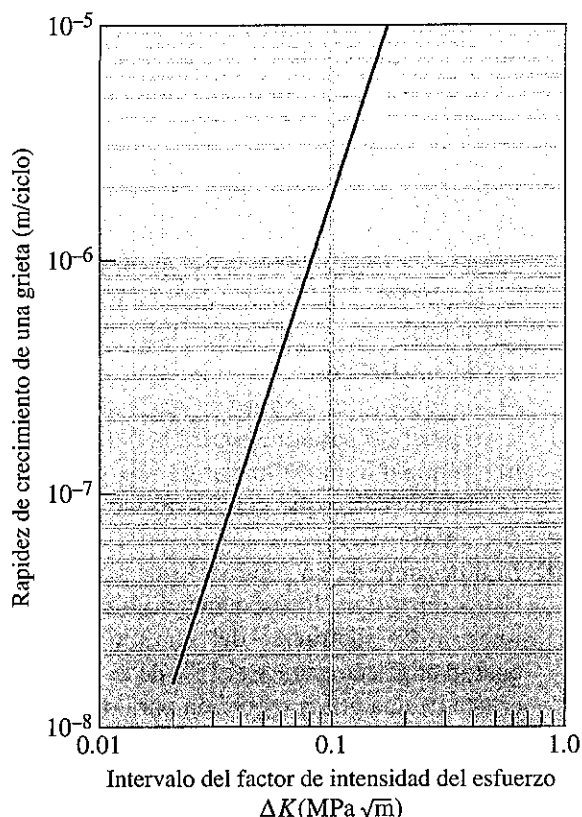


Figura 7-30 Rapidez del crecimiento de una grieta para un polímero de acrílico (para los problemas 7-31, 7-32 y 7-33).

- 7-31** El polímero de acrílico a partir de cual se obtuvo la figura 7-30 tiene una tenacidad crítica a la fractura de $2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Se sujeta a un esfuerzo alternante entre -10 y $+10 \text{ MPa}$. Calcule la rapidez de crecimiento de una grieta en la superficie cuando alcanza una longitud de $5 \times 10^{-6} \text{ m}$ si $f = 1.0$.
- 7-32** Calcule las constantes C y n en la ecuación 7-18 para la rapidez del crecimiento de una grieta de un polímero de acrílico. (Véase la figura 7-30.)
- 7-33** El polímero de acrílico a partir de cual se obtuvo la figura 7-30 se sujeta a un esfuerzo alternante entre 15 y 0 MPa . Las grietas en la superficie más grandes inicialmente detectadas por una prueba no destructiva son de 0.001 mm de longitud. Si la tenacidad crítica a la fractura del polímero es de $2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, calcule el número de ciclos requeridos antes de que ocurra la falla. Sea $f = 1.0$. (Sugerencia: Utilice los resultados del problema 7-32.)
- 7-34** Explique cómo ocurre la falla por fatiga incluso si el material no muestra niveles de

esfuerzo total mayores a la resistencia a la fluencia.

- 7-35** Verifique que la integración de $da/dN = C(\Delta K)^n$ dará la ecuación 7-20.

- 7-36** ¿Qué es el granallado? ¿Cuál es el propósito del uso de este proceso?

Sección 7-9 Termofluencia, ruptura por esfuerzo y corrosión bajo esfuerzo

Sección 7-10 Evaluación del comportamiento de la termofluencia

Sección 7-11 Uso de la información de la termofluencia

- 7-37** ¿Por qué la termofluencia es acelerada por el calentamiento?

- 7-38** Un juguete de un niño se dejó en el fondo de una alberca por varias semanas. Cuando el juguete se sacó del agua, falló después de sólo unos cuantos cientos de ciclos de carga y descarga, aun cuando debió haber sido capaz de soportar miles de ciclos. Especule acerca de por qué el juguete falló antes de lo esperado.

- 7-39** Defina el término “termofluencia” y diferencie la termofluencia de la relajación del esfuerzo.

- 7-40** ¿A qué se refiere con los términos “ruptura por esfuerzo” y “corrosión bajo esfuerzo”?

- 7-41** ¿Cuál es la diferencia entre la falla de un material por termofluencia y la falla por ruptura por esfuerzo?

- 7-42** La energía de activación para la autodifusión en el cobre es de $49\,300 \text{ cal/mol}$. Un espécimen de cobre fluye a $0.002 \frac{\text{pulg}}{\text{pulg}} \text{ hr}$ cuando se le aplica un esfuerzo de $15\,000 \text{ psi}$ a 600°C . Si la rapidez de termofluencia del cobre depende de la autodifusión, determine la rapidez de termofluencia si la temperatura es de 800°C .

- 7-43** Cuando se aplica un esfuerzo de $20\,000 \text{ psi}$ a un material calentado a 900°C , ocurre la ruptura en $25\,000 \text{ h}$. Si la energía de activación para la ruptura es de $35\,000 \text{ cal/mol}$, determine el tiempo de ruptura si la temperatura se reduce a 800°C .

- 7-44** La siguiente información se obtuvo a partir de una prueba de termofluencia para un espécimen que tiene una longitud calibrada de 2.0 pulg y un diámetro inicial de 0.6 pulg . El esfuerzo inicial aplicado al material es de $10\,000 \text{ psi}$. El diámetro del espécimen a la fractura es de 0.52 pulg .

Longitud entre las marcas calibradas (pulg)	Tiempo (h)
2.004	0
2.010	100
2.020	200
2.030	400
2.045	1000
2.075	2000
2.135	4000
2.193	6000
2.230	7000
2.300	8000 (fractura)

Determine

- la carga aplicada al espécimen durante la prueba;
- la longitud aproximada del tiempo durante el cual ocurre la termofluencia lineal;
- la rapidez de termofluencia en $\frac{\text{pulg/pulg}}{h}$ y en $\%/h$, y
- el esfuerzo verdadero que actúa sobre el espécimen en el tiempo de ruptura.

7-45 Un acero inoxidable se mantiene a 705°C bajo diferentes cargas. Se obtiene la siguiente información:

Esfuerzo aplicado (MPa)	Tiempo de ruptura (h)	Rapidez de termofluencia ($\%/h$)
106.9	1200	0.022
128.2	710	0.068
147.5	300	0.201
160.0	110	0.332

Determine los exponentes n y m en las ecuaciones 7-22 y 7-23 que describen la dependencia de la rapidez de termofluencia y el tiempo de ruptura en el esfuerzo aplicado.

7-46 Utilizando la información en la figura 7-27 para una aleación de hierro-cromo-níquel, determine la energía de activación Q_r y la constante m para la ruptura en el intervalo de temperatura de 980 a 1090°C .

7-47 Una barra de 1 pulg de diámetro de una aleación de hierro-cromo-níquel se sujeta a una carga de 2500 lb. ¿Cuántos días sobrevivirá la barra sin romperse a 980°C ? (Véase la figura 7-27a.)

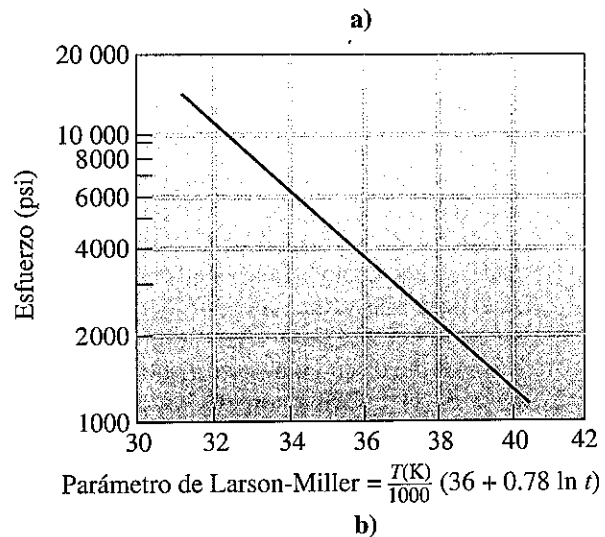
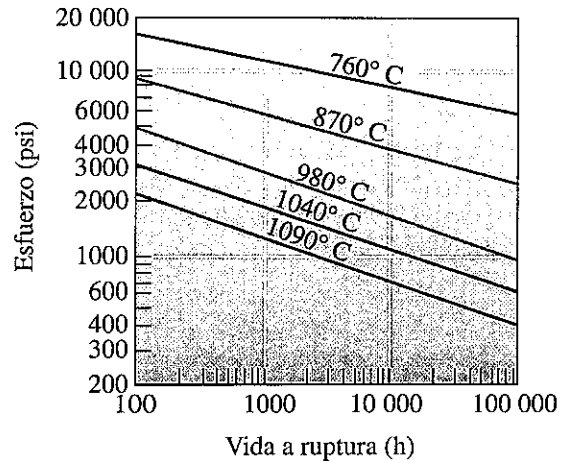


Figura 7-27 (Repetida para los problemas 7-46 a 7-52) Resultados de una serie de pruebas de termofluencia. a) Curvas de ruptura por esfuerzo para una aleación de hierro-cromo-níquel y b) el parámetro de Larson-Miller para el hierro colado dúctil.

7-48 Una barra de 5×20 mm de una aleación de hierro-cromo-níquel opera a 1040°C por 10 años sin romperse. ¿Cuál es la carga máxima que puede aplicarse? (Véase la figura 7-27a.)

7-49 Una aleación de hierro-cromo-níquel debe soportar una carga de 1500 lb a 760°C por 6 años. Calcule el diámetro mínimo de la barra. (Véase la figura 7-27a.)

7-50 Una barra de 1.2 pulg de diámetro de una aleación de hierro-cromo-níquel debe operar por 5 años bajo una carga de 4000 lb. ¿Cuál es la temperatura de operación máxima? (Véase la figura 7-27a.)

- 7-51** Una barra de hierro colado dúctil de 1×2 pulg debe operar por 9 años a 650°C . ¿Cuál es la carga máxima que puede aplicarse? (Véase la figura 7-27b).)
- 7-52** Una barra de hierro fundido dúctil debe operar a un esfuerzo de 6000 psi por 1 año. ¿Cuál es la temperatura máxima permisible? (Véase la figura 7-27b).)



Problemas de diseño

- 7-53** Se diseña un gancho (figura 7-31) para levantar contenedores de minerales en una mina utilizando un material no ferroso (no basado en hierro). (Se utiliza un material no ferroso debido a que el hierro y el acero podrían ocasionar una chispa que encendería los gases explosivos en la mina.) El gancho debe soportar una carga de 25 000 libras y debe utilizarse un factor de seguridad de 2. Se ha determinado que la sección transversal designada “¿?” es el área más crítica; el resto del dispositivo ya está bien diseñado. Determine los requerimientos del diseño para este dispositivo y, con base en la información de las propiedades mecánicas dada en los capítulos 14 y 15 y en los precios de los metales/aleaciones obtenidos a partir de fuentes como sus periódicos

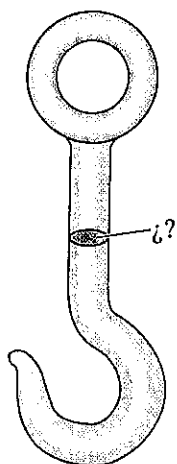


Figura 7-31
Esquema de un gancho (para el problema 7-53).

locales, el sitio en internet del London Metal Exchange o de *The Wall Street Journal*, diseñe el gancho y seleccione un material económico para el gancho.

- 7-54** Una barra de soporte para un tren de aterrizaje de un avión privado se sujeta a una carga de tensión durante el aterrizaje. Se predice que las cargas son tan altas como 40 000 libras. Debido a que la barra es crucial y la falla podría conducir a una pérdida de vidas, la barra debe diseñarse con un factor de seguridad de 4 (es decir, se diseña de tal manera que la barra sea capaz de soportar cargas cuatro veces mayores que las esperadas). La operación del sistema también produce cargas que pueden inducir grietas en la barra. El equipo de prueba no destructiva puede detectar cualquier grieta mayor a 0.02 pulg de profundidad. Con base en los materiales dados en la sección 7-1, diseñe la barra de soporte y el material y justifique su respuesta.
- 7-55** Se diseña una flecha giratoria ligera para una bomba sobre el plano aeroespacial nacional a fin de que soporte una carga cíclica de 15 000 libras durante el servicio. El esfuerzo máximo es el mismo en tensión y compresión. Abajo se muestran los límites de resistencia a la fatiga o resistencias a la fatiga para varios materiales candidatos. Diseñe la flecha, incluyendo un material apropiado, y justifique su solución.

Material	Límite de resistencia a la fatiga/ resistencia a la fatiga (MPa)
Aleación de Al-Mn	110
Aleación de Al-Mg-Zn	225
Aleación de Cu-Be	295
Aleación de Mg-Mn	80
Aleación de Be	180
Aleación de tungsteno	320

- 7-56** Una barra de hierro colado dúctil tiene que soportar una carga de 40 000 lb en un horno de tratamiento térmico utilizado para hacer maleable el hierro colado. La barra se localiza en un sitio que está expuesto de manera continua a 500°C . Diseñe la barra de tal manera que pueda operar al menos 10 años sin fallar.

 Knovel® Problemas

K7-1 Una flecha hueca hecha de acero 4340 AISI tiene un diámetro externo D_o de 4 pulg y un diámetro interno D_i de 2.5 pulg. La flecha gira a 46 rpm por una hora durante cada día. Está soportada por dos cojinetes y cargada en medio con una carga W de 5500 lbf. La distancia entre los cojinetes L es de 78 pulg. El esfuerzo de tensión máximo debido a la flexión para

este tipo de carga cíclica se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$\sigma_m = \frac{8WLD_o}{\pi(D_o^4 - D_i^4)}$$

¿Cuál es la razón de los esfuerzos para este tipo de carga cíclica? ¿Esta flecha duraría un año suponiendo un factor de seguridad de 2?



En aplicaciones como la formación del chasis de automóviles, los metales y las aleaciones se deforman. Las propiedades mecánicas cambian durante el proceso debido al endurecimiento por deformación. El comportamiento del endurecimiento por deformación de los aceros utilizados en la fabricación del chasis influye en la habilidad para moldear formas aerodinámicas. El comportamiento del endurecimiento por deformación también es importante en la mejora de la resistencia a los impactos de los vehículos. (Cortesía de Digital Vision/Getty Images.)

Endurecimiento por deformación y recocido

¿Se ha preguntado alguna vez?

- ¿Por qué al doblar un alambre de cobre éste se vuelve más resistente?
- ¿Qué tipo de acero mejora la resistencia al impacto de los automóviles?
- ¿Cómo se fabrican las latas de aluminio para bebidas?
- ¿Por qué los termoplásticos se vuelven más resistentes cuando se deforman?
- ¿Cuál es la diferencia entre un vidrio de seguridad recocido, templado y laminado?
- ¿Por qué la resistencia del material metálico alrededor de una soldadura podría ser menor que la del material que lo rodea?

En este capítulo, se aprenderá cómo la resistencia de los metales y aleaciones está influido por el procesamiento mecánico y los tratamientos térmicos. En el capítulo 4, se aprendió acerca de las distintas técnicas que pueden endurecer los metales y aleaciones (por ejemplo, el aumento de la densidad de las dislocaciones, la disminución del tamaño de los granos, la aleación, etc.). En este capítulo, se aprenderá cómo aumentar la resistencia de los metales y aleaciones utilizando el trabajo en frío, un proceso por medio del cual un material metálico se deforma y endurece de manera simultánea. También se verá cómo puede utilizarse el trabajo en caliente para moldear metales y aleaciones por medio de la deformación a altas temperaturas sin endurecerlos. Se aprenderá cómo puede utilizarse el tratamiento térmico del recocido para incrementar la ductilidad y contrarrestar el aumento de la dureza ocasionado por el trabajo en frío. Los temas explicados en este capítulo se aplican en particular a metales y aleaciones.

¿Qué hay acerca de los polímeros, vidrios y cerámicas? ¿También exhiben endurecimiento por deformación? Se mostrará que la deformación de los polímeros termoplásticos con frecuencia produce un efecto de endurecimiento, pero el mecanismo del endurecimiento por deformación es completamente distinto en los polímeros que en los materiales metálicos. La resistencia de la mayoría de los materiales quebradizos como las cerámicas y los vidrios depende de las imperfecciones y de la distribución de los tamaños de las imperfecciones (capítulo 7). Por tanto, los vidrios inorgánicos y las cerámicas no responden bien al endurecimiento por deformación. Es decir, se deben considerar estrategias diferentes para endurecer estos materiales. En este contexto, se aprenderán los principios del templado y el recocido de vidrios.

Se comienza con la explicación del endurecimiento por deformación en los materiales metálicos en el contexto de las curvas de esfuerzo-deformación unitaria.

8-1

Relación del trabajo en frío con la curva esfuerzo-deformación

En la figura 8-1a) se muestra una curva de esfuerzo-deformación unitaria para un material metálico dúctil. Si se aplica un esfuerzo S_1 que sea mayor que la resistencia a la fluencia S_y , ocasiona una deformación o deformación permanente. Cuando se elimina el esfuerzo, deja una deformación de e_1 . Si se prepara una muestra para la prueba de tensión del material metálico que ha sido esforzado previamente a S_1 y se vuelve a probar ese material, se obtiene la curva de

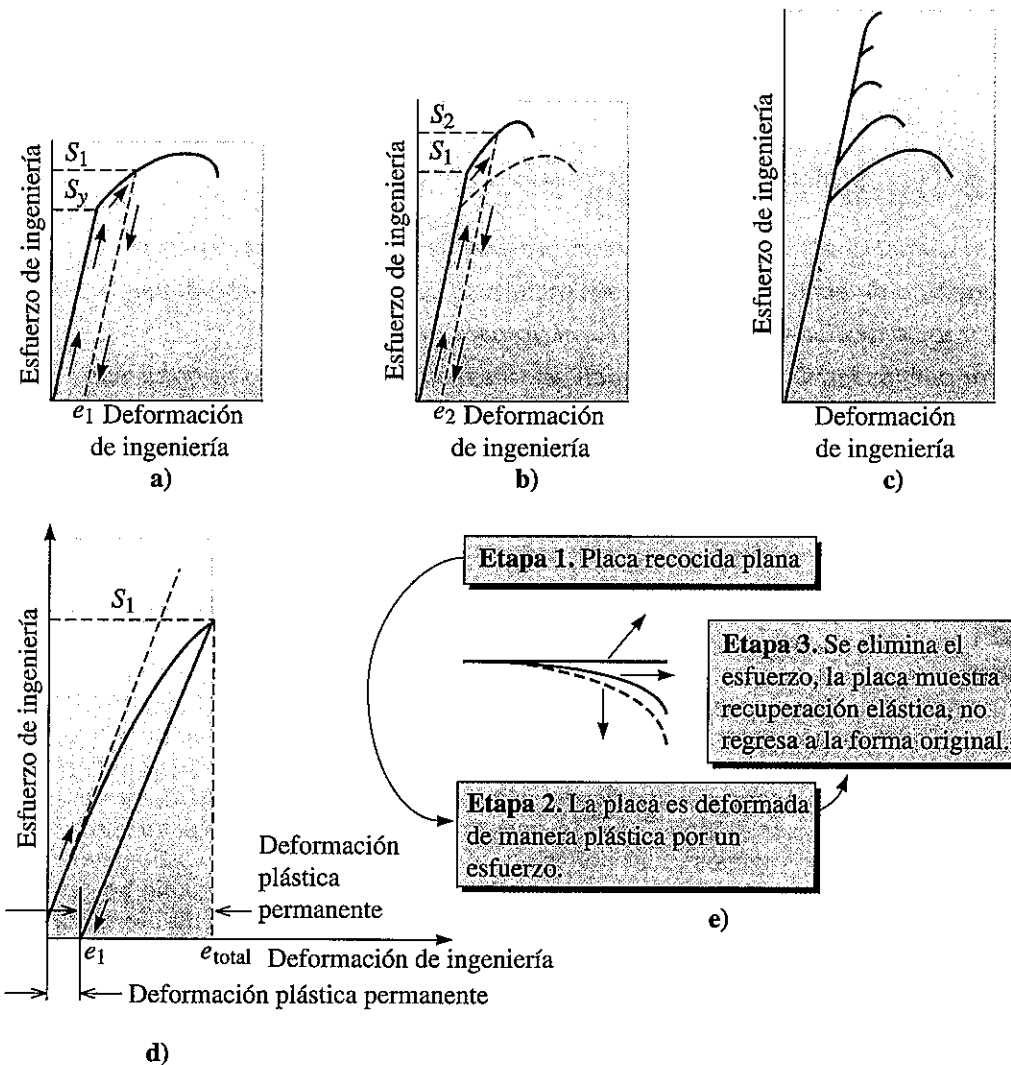


Figura 8-1 Desarrollo del endurecimiento por deformación a partir del diagrama de esfuerzo-deformación ingenieriles. a) Un espécimen se esfuerza más allá de la resistencia a la fluencia S_y antes de que se elimine el esfuerzo. b) El espécimen tiene ahora una resistencia a la fluencia y una resistencia a la tensión mayores, pero menor ductilidad. c) Al repetir el procedimiento, la resistencia continúa aumentando y la ductilidad continúa disminuyendo hasta que la aleación se vuelve muy quebradiza. d) La deformación total es la suma de las componentes elástica y plástica. Cuando se elimina el esfuerzo, se recupera la deformación elástica, pero la deformación plástica no. e) Ilustración de la recuperación elástica. (Fuente: Reimpresión de Engineering Materials I, segunda edición, M. F. Ashby y D. R. H. Jones, 1996. Copyright © 1996 Butterworth-Heinemann. Reimpresión con permiso de Elsevier Science.)

esfuerzo-deformación mostrada en la figura 8-1b). Este nuevo espécimen de prueba comenzaría a deformarse o a fluir de manera plástica a un nivel de esfuerzo S_1 . Se define el *esfuerzo de flujo* como el esfuerzo que se necesita para iniciar el flujo plástico en un material deformado con anterioridad. Por tanto, S_1 es ahora el esfuerzo de flujo del material. Si se continúa aplicando un esfuerzo hasta que se alcance S_2 entonces se libera el esfuerzo y de nuevo se vuelve a probar el material metálico, el nuevo esfuerzo de flujo es S_2 . Cada vez que se aplica un esfuerzo mayor, el esfuerzo de flujo y la resistencia a la tensión aumentan y la ductilidad disminuye. Con el tiempo se endurece el material metálico hasta que el esfuerzo de flujo y las resistencias a la tensión y a la ruptura son iguales y no exista ductilidad [figura 8-1c)]. En este punto, el material metálico no puede deformarse más de manera plástica. Las figuras 8-1d) y e) están relacionadas con la recuperación elástica, un concepto que se explica más adelante en esta sección.

Al aplicar un esfuerzo que exceda la resistencia a la fluencia* original del material metálico, se ha **endurecido por deformación** o **trabajado en frío** el material metálico, mientras que se deforma de manera simultánea. Ésta es la base para varias técnicas de fabricación, tales como el trefilado. La figura 8-2 ilustra varios procesos de fabricación que usan procesos de trabajo en frío y trabajo en caliente. Más adelante en este capítulo se explicará la diferencia entre **trabajo en caliente** y **trabajo en frío**. Se utilizan muchas técnicas para el **procesamiento de deformación** para darle forma y endurecer de manera simultánea un material por medio del trabajo en frío (figura 8-2). Por ejemplo, se utiliza el **laminado** para producir placas, hojas o láminas metálicas. El **forjado** deforma el metal en una cavidad de un molde, produciendo formas relativamente complejas tales como cigüeñales o bielas de automóviles. En el **trefilado**, se tira de una barra metálica a través de un dado para producir un alambre o fibra. En la **extrusión**, se empuja un material a través de un dado para formar productos de secciones transversales uniformes, incluyendo barras, tubos o molduras de aluminio para puertas o ventanas. Se utiliza el **embutido profundo** para formar el cuerpo de latas de bebidas de aluminio. El **estiramiento** y el **doble** se utilizan para moldear hojas del material. Por tanto, el trabajo en frío es una manera efectiva de moldear materiales metálicos mientras se aumenta de manera simultánea su resistencia. El inconveniente de este proceso es la pérdida de ductilidad. Si toma un alambre de metal y lo dobla de manera repetida se endurecerá y con el tiempo se romperá debido al endurecimiento por deformación. Este proceso se utiliza en varios productos, especialmente en aquellos que no van a ser expuestos a temperaturas muy altas. Por ejemplo, una lata de aluminio para bebidas puede disminuir en casi 70% su resistencia como resultado del endurecimiento por deformación que ocurre durante su fabricación. Una parte de la resistencia de las latas de aluminio también proviene de los elementos de aleación (por ejemplo, Mg) adicionados. Observe que varios de los procesos como el laminado, pueden llevarse a cabo utilizando trabajo en frío y en caliente. Los pros y los contras de utilizar cada uno se explicarán más adelante en este capítulo.

Exponente del endurecimiento por deformación (n) La respuesta de un material metálico al trabajo en frío está dada por el **exponente del endurecimiento por deformación**, el cual es la pendiente de la porción plástica de la curva de *esfuerzo verdadero-deformación verdadera*. Esta relación está gobernada por el llamado comportamiento de la ley de potencias de acuerdo con la curva de *esfuerzo verdadero σ -deformación verdadera ϵ* en la figura 8-3 cuando se utiliza una escala logarítmica

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (8-1)$$

o

$$\ln \sigma = \ln K + n \ln \epsilon \quad (8-2)$$

La constante K (coeficiente de resistencia) es igual al esfuerzo cuando $\epsilon_t = 1$. Se obtienen grados de endurecimiento mayores para una deformación dada a medida que n aumenta como se muestra en la figura 8-3. Para los metales, el endurecimiento por deformación es el resultado

*También conocido como límite elástico.

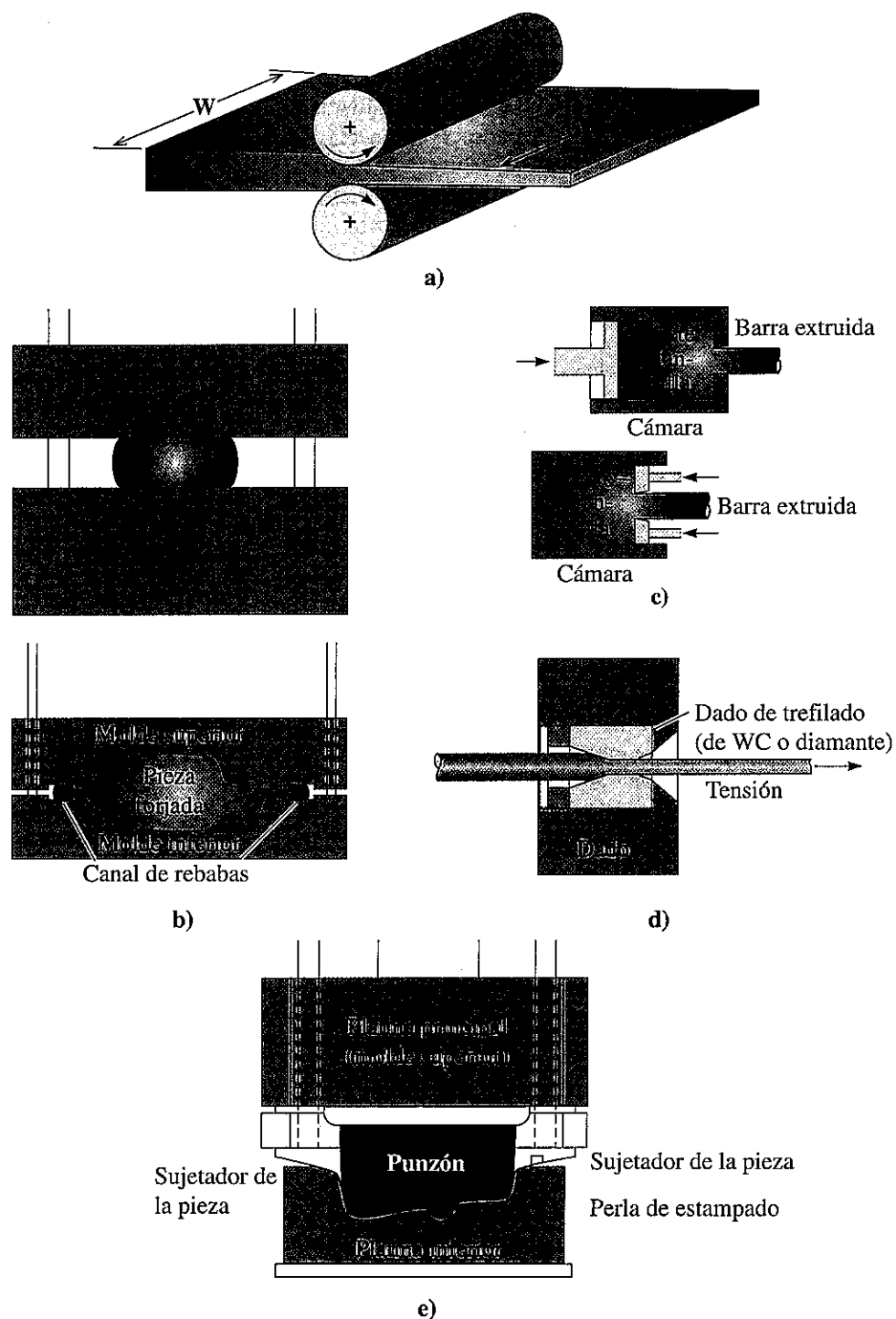


Figura 8-2 Procesos de fabricación que utilizan el trabajo en frío al igual que el trabajo en caliente. Métodos de metalistería comunes. a) Laminado o rolado. b) Forjado (con molde abierto y cerrado). c) Extrusión (directa e indirecta). d) Trefilado. e) Estampado. (Adaptada de Meyers, M. A. y Chawla, K. K., *Mechanical behavior of Materials*, segunda edición, Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra, 2009, fig. 6.1. Con permiso de Cambridge University Press.)

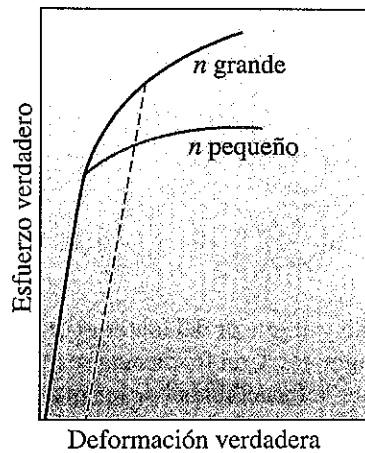


Figura 8-3

Curvas de esfuerzo verdadero-deformación verdadera para metales con exponentes del endurecimiento por deformación grandes y pequeños. Se obtienen grados de endurecimiento mayores para una deformación dada para el metal con n grande.

de la interacción y multiplicación de las dislocaciones. El exponente del endurecimiento por deformación es relativamente bajo para los metales CH, pero es mayor para los CCCu y, en particular, para los metales CCCa (tabla 8-1). Los metales con un exponente del endurecimiento por deformación bajo responden de manera deficiente al trabajo en frío. Si se toma un alambre de cobre y se dobla, el alambre doblado es más resistente como resultado del endurecimiento por deformación.

Sensibilidad a la rapidez de deformación (m) La sensibilidad a la rapidez de deformación (m) del esfuerzo se define como

$$m = \left[\frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial(\ln \dot{\epsilon})} \right] \quad (8-3)$$

Ésta describe cómo cambia el esfuerzo de flujo con la rapidez (velocidad) de deformación. La sensibilidad de la rapidez de deformación para los metales cristalinos por lo regular es menor a 0.1, pero aumenta con la temperatura. Como se mencionó anteriormente, el comportamiento mecánico de las hojas de acero bajo rapidez de deformación altas ($\dot{\epsilon}$) no sólo es importante para el moldeo, sino también para conocer qué tan bien se desempeñará el acero bajo una carga de alto impacto. La resistencia al impacto de las hojas de acero es una consideración importante para la industria automotriz. Los aceros que se endurecen de manera rápida bajo la carga de impacto son útiles en la absorción de la energía mecánica.

Un valor positivo de m implica que el material resistirá el rebajo (capítulo 6). Los valores altos de m y n significan que el material puede exhibir una formabilidad mejor al

TABLA 8-1 ■ Exponentes del endurecimiento por deformación y coeficientes de resistencia de metales y aleaciones comunes

Metal	Estructura cristalina	n	K (psi)
Titanio	CH	0.05	175 000
Acero aleado recocido	CCCu	0.15	93 000
Acero al medio carbono templado y revenido	BCC	0.10	228 000
Molibdeno	BCC	0.13	105 000
Cobre	CCCa	0.54	46 000
Cu-30% Zn	FCC	0.50	130 000
Acero inoxidable austenítico	FCC	0.52	220 000

Adaptado de G. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, 1961 y otras fuentes.

estirarse; sin embargo, estos valores no afectan las características del embutido profundo. Para el embutido profundo, es importante la *razón de la deformación plástica* (r). Se define la razón de la deformación plástica como:

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{h}{h_0}\right)} \quad (8-4)$$

En esta ecuación, w y h corresponden al ancho y al grosor del material que se está procesando y el subíndice cero indica las dimensiones originales. Con frecuencia se utilizan diagramas del límite de formabilidad para comprender mejor la **formabilidad** de los materiales metálicos. En general, se define la formabilidad de un material como la habilidad de un material para mantener su integridad mientras se está moldeando. La formabilidad de un material con frecuencia se describe en términos de dos deformaciones —una deformación principal siempre positiva y una deformación menor que puede ser positiva o negativa—. Como se ilustra en la figura 8-4, las condiciones de deformación en el lado izquierdo hacen que los círculos estampados en una muestra se transformen en elipses; para las condiciones a la derecha, los círculos más pequeños estampados en las muestras se vuelven círculos grandes que indican un estiramiento. Los diagramas del límite de formabilidad ilustran las regiones específicas sobre las que puede procesarse el material sin comprometer la integridad mecánica.

Recuperación elástica Otro punto a observar es que cuando se deforma un material metálico utilizando un esfuerzo mayor que su resistencia a la fluencia a un nivel mayor (S_1 en la figura 8-1d)), la deformación correspondiente que existe al esfuerzo S_1 se obtiene bajando una línea perpendicular al eje horizontal (punto e_{total}). Se recupera una deformación igual a $(e_{\text{total}} - e_1)$ dado que es elástico en naturaleza. A la *deformación elástica* que se recupera después de que un material se ha deformado de *manera plástica* se le conoce como *recuperación elástica* [figura 8-1e)]. La recuperación elástica es extremadamente importante para la formación de los paneles de la carrocería de los automóviles a partir de hojas de acero

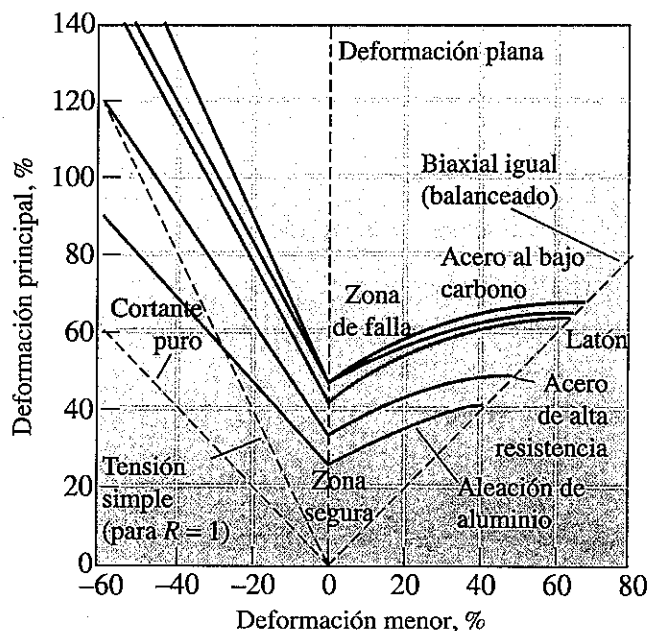


Figura 8-4
Diagrama del límite de formabilidad para diferentes materiales. (Fuente: *Reimpreso de Metals Handbook-Edición de escritorio, segunda edición, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, p. 146, fig. 5 © 1998 ASM International. Reimpreso con permiso.*)

junto con otras muchas aplicaciones. Este efecto también se observa en el procesamiento de materiales poliméricos procesados, por ejemplo, por extrusión. Esto se debe a que muchos polímeros son viscoelásticos, como se explicó en el capítulo 6.

Es posible tomar en cuenta la recuperación plástica en el diseño de componentes; sin embargo, la variabilidad de la recuperación elástica hace esto muy difícil. Por ejemplo, un proveedor automotriz recibirá rollos de hojas de acero de diferentes fabricantes de acero, y aun cuando las especificaciones para el acero sean idénticas, la variación de la recuperación elástica en los aceros recibidos de cada fabricante (o incluso para distintos lotes del mismo fabricante) hará más difícil obtener componentes trabajados en frío que tengan precisamente la misma forma y dimensiones.

Efecto Bauschinger Considere un material que se ha sujetado a una deformación plástica a la tensión. Después, considere dos muestras por separado (*A* y *B*) de este material. La muestra de prueba *A* en tensión y la muestra *B* bajo compresión. Se observa que para el material deformado el esfuerzo de flujo a la tensión ($\sigma_{\text{flujo, tensión}}$) para la muestra *A* es mayor que la resistencia a la fluencia de compresión ($\sigma_{\text{flujo, compresión}}$) para la muestra *B*. A este efecto, en el que un material sujeto a tensión muestra una reducción en la resistencia en compresión, se le conoce como **efecto Bauschinger**. Observe que se está comparando la resistencia a la fluencia de un material bajo compresión y tensión después de que el material se ha sujetado a una deformación plástica bajo un esfuerzo de tensión. El efecto Bauschinger también se observa en la inversión de esfuerzos. Considere una muestra deformada bajo compresión. Se pueden evaluar dos muestras por separado *C* y *D*. La muestra sujeta a un *esfuerzo de compresión* (*C*) muestra un esfuerzo de flujo mayor que la muestra *D* sujeta a un esfuerzo a la tensión. El efecto Bauschinger desempeña una función importante en el procesamiento mecánico de los aceros y otras aleaciones.

8-2 Mecanismos del endurecimiento por deformación

Se obtiene un endurecimiento durante la deformación de un material metálico incrementando el número de dislocaciones. Antes de la deformación, la densidad de las dislocaciones es alrededor de 10^6 cm de líneas de dislocación por centímetro cúbico del metal —una concentración de las dislocaciones relativamente pequeña.

Cuando se aplica un esfuerzo mayor que la resistencia a la fluencia, las dislocaciones comienzan a deslizarse (ley de Schmid, capítulo 4). Con el tiempo, una dislocación que se mueve sobre su plano de deslizamiento encuentra obstáculos que fijan la línea de dislocaciones. A medida que se continúa aplicando el esfuerzo, la dislocación intenta moverse curvándose en el centro. La dislocación puede moverse tan lejos que se produce un bucle (figura 8-5). Cuando el bucle de la dislocación por fin se toca a sí mismo, se crea una nueva dislocación. La dislocación original sigue fija y puede crear bucles de dislocación adicionales. A este mecanismo para generar dislocaciones se le llama **fuentes de Frank-Read**. La figura 8-5e) muestra una micrografía electrónica de una fuente de Frank-Read.

La densidad de las dislocaciones puede aumentar a alrededor de 10^{12} cm de líneas de dislocación por centímetro cúbico del metal durante el endurecimiento por deformación. Como se explicó en el capítulo 4, el movimiento de las dislocaciones es el mecanismo para la fluencia plástica que ocurre en los materiales metálicos; sin embargo, cuando se tienen demasiadas dislocaciones, interfieren con sus propios movimientos. Una analogía de esto es que cuando se tienen demasiadas personas en una habitación, es difícil para ellas moverse de un lado a otro. El resultado es un aumento en la resistencia, pero una reducción en la ductilidad, para los materiales metálicos que han experimentado el endurecimiento por trabajo.

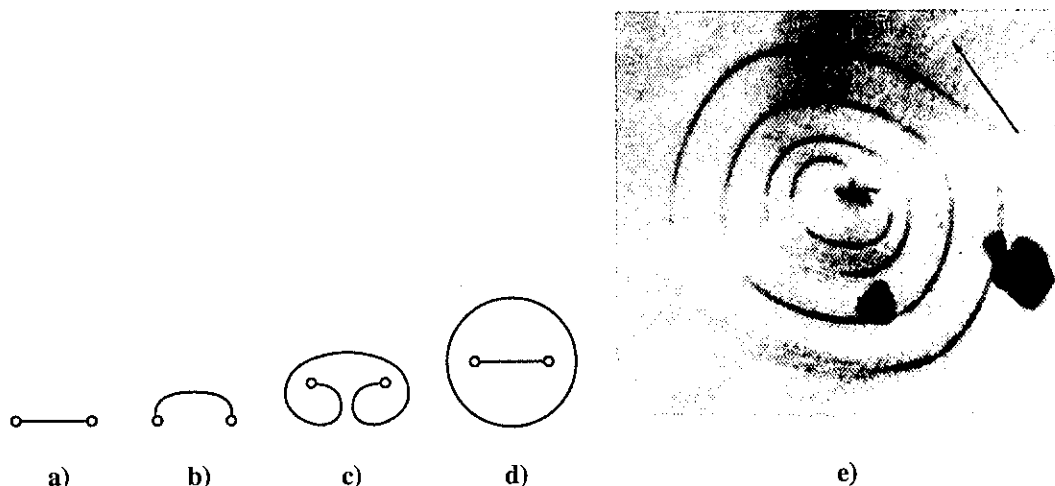


Figura 8-5 La fuente de Frank-Read puede generar dislocaciones. a) Una dislocación está fija en sus extremos por los defectos de red. b) A medida que la dislocación continúa moviéndose, la dislocación se arquea, c) con el tiempo se flexiona de regreso sobre sí misma. d) Por último se forma un ciclo de dislocación y se crea una nueva dislocación. e) Micrografía electrónica de una fuente de Frank-Read (330 000 $\times$). (Adaptado de Brittain, J., "Climb Sources in Beta Prime-NiAl", Metallurgical Transactions, vol. 6A, abril de 1975.)

Las cerámicas contienen dislocaciones e incluso pueden endurecerse por deformación en un grado pequeño; sin embargo, las dislocaciones en las cerámicas por lo general no son muy móviles. Las cerámicas policristalinas también contienen porosidad. Como resultado, las cerámicas se comportan como materiales quebradizos y no es posible una deformación y un endurecimiento significativos por trabajo en frío. De manera similar, los materiales enlazados de manera covalente como el silicio (Si) son tan quebradizos como para endurecerse por trabajo de manera apreciable. Los vidrios son amorfos y no contienen dislocaciones y por tanto no pueden endurecerse por deformación.

Los **termoplásticos** son polímeros como el polietileno, el poliestireno y el nailon. Estos materiales consisten en moléculas que son cadenas largas parecidas al espagueti. Los termoplásticos se endurecerán cuando se deformen. Sin embargo, éste *no* es un endurecimiento por deformación debido a la multiplicación de las dislocaciones sino, en su lugar, el endurecimiento de estos materiales involucra la alineación y posiblemente la cristalización localizada de las moléculas largas parecidas a cadenas. Cuando se le aplica a los polímeros termoplásticos como el polietileno un esfuerzo mayor que la resistencia a la fluencia, se rompen los enlaces de van der Waals (capítulo 2) entre las moléculas en las distintas cadenas. Las cadenas se endurecen y se alinean en la dirección del esfuerzo aplicado (figura 8-6). La resistencia del polímero, en particular en la dirección del esfuerzo aplicado, aumenta como resultado de la alineación de las cadenas poliméricas en la dirección del esfuerzo aplicado. Como se explicó en capítulos anteriores, el procesamiento de botellas de tereftalato de polietileno (PET) utilizando el proceso de soplado-estiramiento involucra tal cristalización inducida por esfuerzo. Los polímeros termoplásticos se vuelven más resistentes como resultado de la alineación local de las cadenas de polímeros que ocurre como resultado del esfuerzo aplicado. Este incremento en la resistencia se observa en la curva de esfuerzo-deformación de los termoplásticos comunes. Muchas técnicas utilizadas para el procesamiento de polímeros son similares a las utilizadas para la fabricación de materiales metálicos. La extrusión, por ejemplo, es la técnica de procesamiento de polímeros más ampliamente utilizada. Aunque muchas de estas técnicas comparten similitudes conceptuales, existen diferencias importantes entre los mecanismos por medio de los cuales se endurecen los polímeros durante su procesamiento.

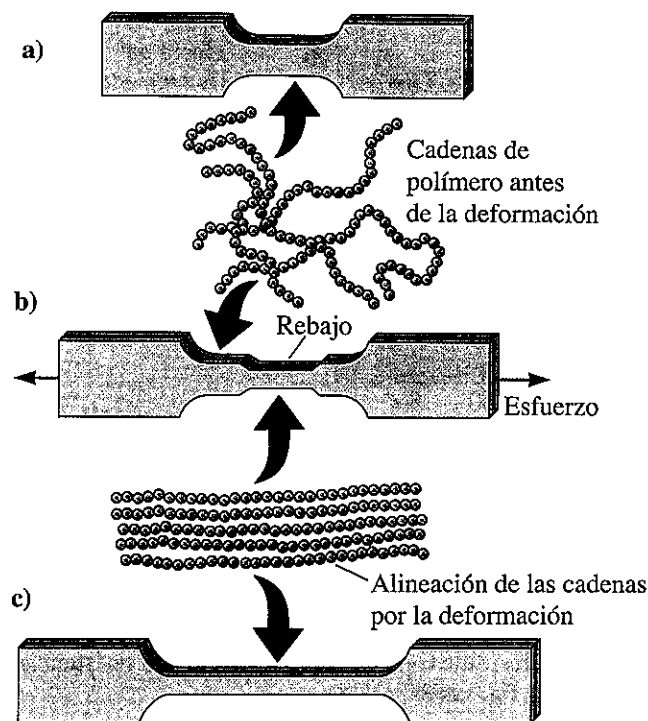


Figura 8-6

En una barra de tensión de polímero termoplástico no deformado, a) las cadenas de polímero están orientadas de manera aleatoria. b) Cuando se aplica un esfuerzo, se desarrolla un rebajo a medida que las cadenas se alinean de manera local. El rebajo continúa creciendo hasta que las cadenas se han alineado en toda la longitud calibrada. c) Se incrementa la resistencia del polímero.

8-3

Propiedades en función del porcentaje de trabajo en frío

Al controlar la cantidad de deformación plástica, se controla el endurecimiento por deformación. Por lo regular se mide la cantidad de deformación definiendo el porcentaje de trabajo en frío:

$$\text{Porcentaje de trabajo en frío} = \left[\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right] \times 100 \quad (8-5)$$

donde A_0 es el área original de la sección transversal del metal y A_f es el área final de la sección transversal después de la deformación. Para el caso del laminado en frío se utiliza el porcentaje de la reducción del grosor como la medida del trabajo en frío de acuerdo con

$$\text{Porcentaje de la reducción en el grosor} = \left[\frac{t_0 - t_f}{t_0} \right] \times 100 \quad (8-6)$$

donde t_0 es el grosor inicial de la hoja y t_f es el grosor final.

En la figura 8-7 se muestra el efecto del trabajo en frío sobre las propiedades mecánicas de cobre comercialmente puro. A medida que el trabajo en frío aumenta, las resistencias a la fluencia y a la tensión se incrementan; sin embargo, la ductilidad disminuye y se aproxima a cero. El metal se rompe si se intenta más trabajo en frío; por tanto, existe una cantidad máxima de trabajo en frío o deformación que puede llevarse a cabo sobre un material metálico antes de que se vuelva demasiado quebradizo y se rompa.

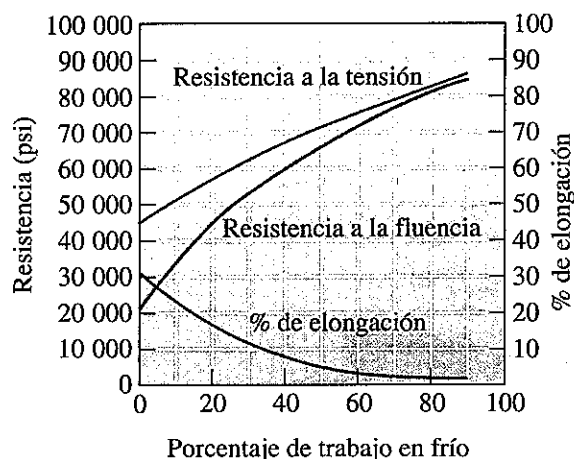


Figura 8-7
Efecto del trabajo en frío sobre las propiedades mecánicas del cobre.

Ejemplo 8-1

Trabajo en frío de una placa de cobre

Una placa de cobre de 1 cm de grosor se reduce en frío a 0.50 cm y después se reduce más a 0.16 cm. Determine el porcentaje total de trabajo en frío y la resistencia a la tensión de la placa de 0.16 cm (vea las figuras 8-7 y 8-8).

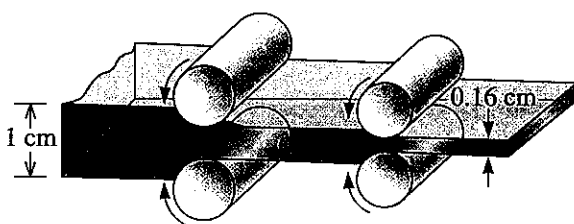


Figura 8-8
Diagrama que muestra el laminado de una placa de 1 cm a una placa de 0.16 cm (para el ejemplo 8-1).

SOLUCIÓN

Observe que debido a que el ancho de la placa no cambia durante el laminado, el trabajo en frío puede expresarse como el porcentaje de la reducción en el grosor t .

La definición de trabajo en frío es el cambio del porcentaje entre las áreas original y final de la sección transversal, sin importar cuántas etapas intermedias estén involucradas. Por tanto, el trabajo en frío total es

$$\% \text{ TF} = \left[\frac{t_0 - t_f}{t_0} \right] \times 100 = \left[\frac{1 \text{ cm} - 0.16 \text{ cm}}{1 \text{ cm}} \right] \times 100 = 84\%$$

y, a partir de la figura 8-7, la resistencia a la tensión es alrededor de 85 000 psi.

Se pueden predecir las propiedades de un metal o de una aleación si se conoce la cantidad de trabajo en frío durante el procesamiento. Entonces se puede decidir si el componente tiene una resistencia adecuada en las localizaciones críticas.

Cuando se desea seleccionar un material para un componente que requiere ciertas propiedades mecánicas mínimas, se puede diseñar el proceso de deformación. Primero se determina el porcentaje necesario de trabajo en frío y después, utilizando las dimensiones finales deseadas, se calculan las dimensiones originales del metal a partir de la ecuación del trabajo en frío.

Ejemplo 8-2**Diseño de un proceso de trabajo en frío**

Diseñe un proceso de fabricación para producir una placa de cobre de 0.1 cm de grosor que tenga al menos una resistencia a la tensión de 65 000 psi, una resistencia a la fluencia de 60 000 psi y 5% de elongación.

SOLUCIÓN

A partir de la figura 8-7, se necesita al menos 35% de trabajo en frío para producir una resistencia a la tensión de 65 000 psi y 40% de trabajo en frío para producir una resistencia a la fluencia de 60 000 psi, pero se necesita menos de 45% de trabajo en frío para cumplir el requerimiento de 5% de elongación. Por tanto, cualquier trabajo en frío entre 40 y 45% da las propiedades mecánicas requeridas.

Para producir la placa sería apropiado un proceso de laminado en frío. El grosor original de la placa de cobre antes del laminado puede calcularse a partir de la ecuación 8-5, suponiendo que el ancho de la placa no cambia. Debido a que hay un intervalo de trabajo en frío permisible —entre 40 y 45%— hay un intervalo del grosor inicial de la placa:

$$\% \text{TF}_{\min} = 40 = \left[\frac{t_{\min} - 0.1 \text{ cm}}{t_{\min}} \right] \times 100, \quad \therefore t_{\min} = 0.167 \text{ cm}$$

$$\% \text{TF}_{\max} = 45 = \left[\frac{t_{\max} - 0.1 \text{ cm}}{t_{\max}} \right] \times 100, \quad \therefore t_{\max} = 0.182 \text{ cm}$$

Para producir la placa de cobre de 0.1 cm, se comienza con una placa de cobre de 0.167 a 0.182 cm en la condición más blanda posible, después se lamina en frío la placa de 40 a 45% para lograr el grosor de 0.1 cm.

8-4**Microestructura, endurecimiento por textura y esfuerzos residuales**

Durante la deformación plástica utilizando trabajo en frío o en caliente con frecuencia se produce una microestructura que consiste en granos que se alargan en dirección del esfuerzo aplicado (figura 8-9).

Comportamiento anisotrópico Durante la deformación, los granos rotan al igual que se alargan, ocasionando que ciertas direcciones y planos cristalográficos se alineen con la dirección a la que se aplica el esfuerzo. En consecuencia, se desarrollan orientaciones, o texturas, preferidas y se ocasiona un comportamiento anisotrópico.

En los procesos como el trefilado y la extrusión, se produce una **textura fibrosa**. El término “fibrosa” se refiere a los granos en el material metálico, los cuales se alargan en una dirección paralela al eje del alambre o a un producto extruido. En los metales CCCu, las direcciones $\langle 110 \rangle$ se alinean con el eje del alambre. En los metales CCCa, se alinean las direcciones $\langle 111 \rangle$ o $\langle 100 \rangle$. Esto da la resistencia más alta a lo largo del eje del alambre o del extruido (producto que se está extruyendo, como un tubo), lo cual es lo que se desea.

Como se mencionó antes, se observa un efecto un poco similar en los materiales termoplásticos cuando se trefilan en fibras u otras formas. La causa, como se explicó anteriormente, es que las cadenas de polímero se alinean lado con lado (laterales) a lo largo de la longitud de la fibra. La resistencia es mayor a lo largo del eje de la fibra de polímero. Este tipo de endurecimiento también se observa en las botellas de plástico PET hechas utilizando el

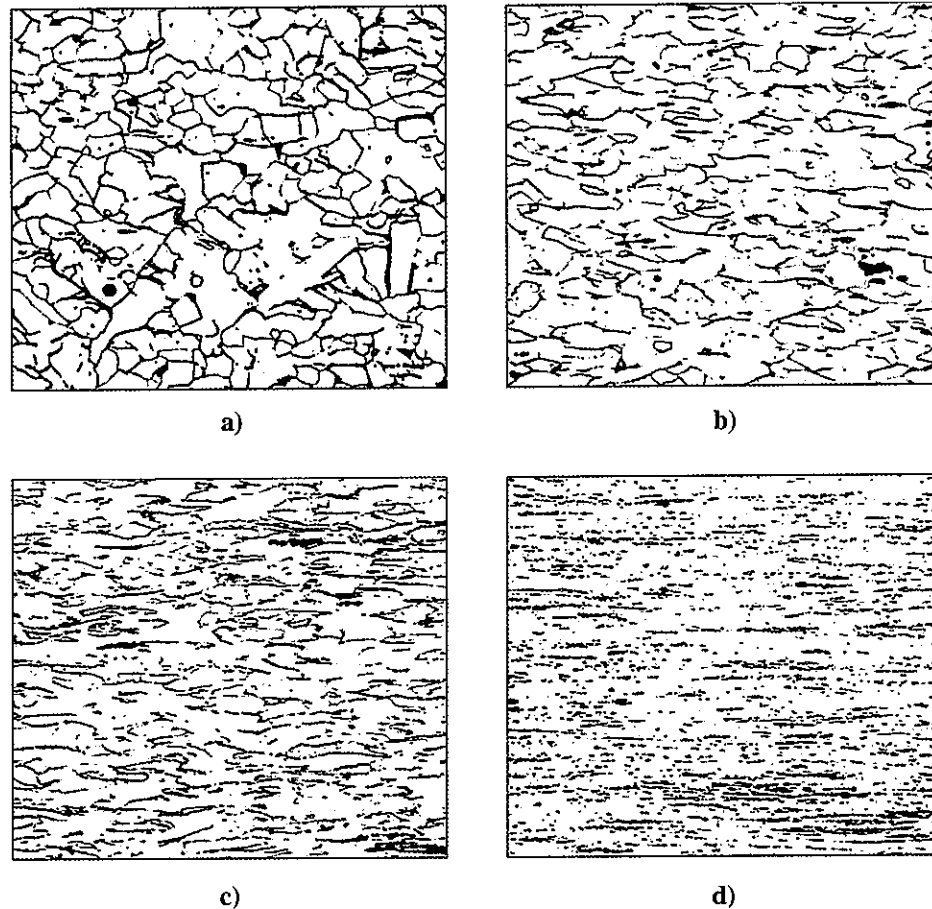


Figura 8-9 Estructura granular fibrosa de un acero al bajo carbono producida por el trabajo en frío: a) 10% de trabajo en frío, b) 30% de trabajo en frío, c) 60% de trabajo en frío y d) 90% de trabajo en frío (250×). (De ASM Handbook, vol. 9, Metallography and Microstructure (1985) ASM International, Materials Park, OH 44073-0002. Utilizada con permiso.)

proceso de soplado-estiramiento. Este proceso ocasiona la alineación de las cadenas de polímero a lo largo de las direcciones radial y longitudinal, lo que conduce a un incremento en la resistencia de las botellas de PET a lo largo de esas direcciones.

En procesos como el laminado, los granos se orientan en una dirección y un plano cristalográfico preferido, dando una **textura laminar**. Las propiedades de una hoja o placa laminada dependen de la dirección en la que se mide la propiedad. La figura 8-10 resume las propiedades de tensión de una aleación de aluminio-litio (Al-Li) trabajada en frío. Para esta aleación, la resistencia es la más alta paralela a la dirección del laminado, mientras que la ductilidad es mayor a un ángulo de 45° con la dirección de laminado. Al endurecimiento que ocurre por el desarrollo de la anisotropía o de una textura, se le conoce como **endurecimiento por textura**. Como se indicó en el capítulo 6, el módulo de Young de los materiales también depende de las direcciones cristalográficas en los monocristales. Por ejemplo, el módulo de Young del hierro a lo largo de las direcciones [111] o [100] es de ~260 y 140 GPa, respectivamente. La dependencia de la resistencia a la fluencia de la textura es incluso más grande. El desarrollo de la textura no sólo tiene un efecto sobre las propiedades mecánicas sino también sobre las propiedades magnéticas y otras de los materiales. Por ejemplo, los aceros magnéticos con granos orientados hechos a partir de 3% Si y 97% Fe utilizados en los núcleos de transformadores se texturizan por medio de un procesamiento termomecánico para optimizar sus propiedades eléctricas y magnéticas. En la tabla 8-2 se muestran algunas

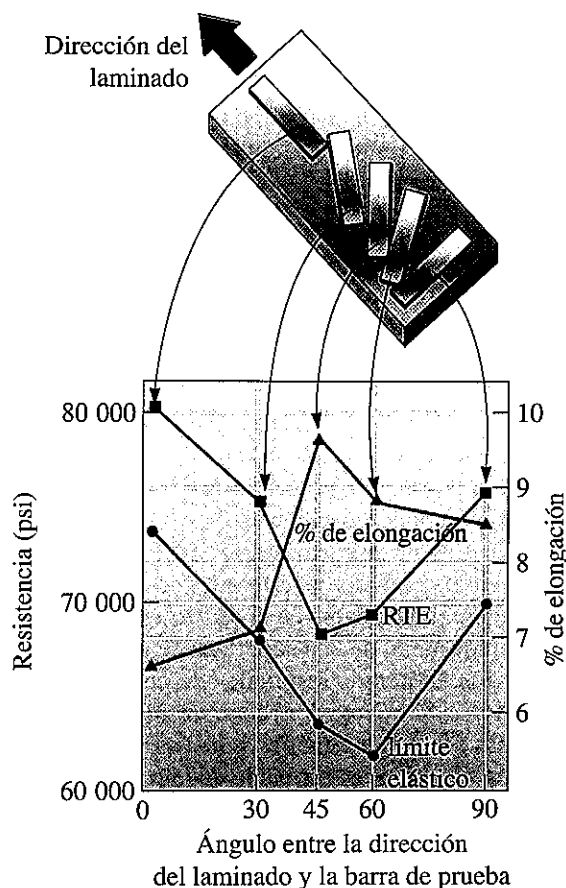


Figura 8-10

Comportamiento anisotrópico en un material laminado de aluminio-litio utilizado en aplicaciones aeroespaciales. La representación relaciona la posición de las barras de tensión con las propiedades mecánicas que se obtienen.

texturas fibrosas (trefilado de alambres) y de hoja (laminado) comunes con distintas estructuras cristalinas.

Desarrollo de la textura en películas delgadas El desarrollo de la orientación o textura cristalográfica también ocurre en las películas delgadas. En el caso de las películas delgadas con frecuencia la textura es resultado de los mecanismos del proceso de crecimiento y no un resultado de los esfuerzos aplicados de manera externa. En algunas ocasiones, los esfuerzos térmicos generados de manera interna también desempe-

TABLA 8-2 ■ Texturas de trefilado de alambre y extrusión y laminares en los materiales

Estructura cristalina	Trefilado de alambre y extrusión (textura fibrosa) (dirección paralela al eje del alambre)	Textura laminar o de laminado
CCCa	$\langle 111 \rangle$ y $\langle 100 \rangle$	Planos $\{110\}$ paralelos al plano del laminado Direcciones $\langle 112 \rangle$ paralelas a la dirección del laminado
CCCu	$\langle 110 \rangle$	Planos $\{001\}$ paralelos al plano del laminado Direcciones $\langle 110 \rangle$ paralelas a la dirección del laminado
CH	$\langle 10\bar{1}0 \rangle$	Planos $\{0001\}$ paralelos al plano del laminado Direcciones $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ paralelas a la dirección del laminado

ñan una función en la determinación de la textura cristalográfica de las películas delgadas. Las películas delgadas orientadas pueden ofrecer mejores propiedades eléctricas, ópticas o magnéticas. El **análisis de figura de polo**, técnica basada en la difracción de rayos x (DRX) (capítulo 3), o una técnica de microscopía electrónica de barrido especializada conocida como **microscopía de orientación** se utilizan para identificar las texturas en los diferentes materiales de ingeniería (películas, hojas, cristales sencillos, etcétera).

Esfuerzos residuales Una pequeña porción del esfuerzo aplicado se almacena en la forma de **esfuerzos residuales** dentro de la estructura como una intrincada red de dislocaciones. La presencia de dislocaciones incrementa la energía interna total de la estructura. A medida que la extensión del trabajo en frío se incrementa, el nivel de la energía interna total del material aumenta. Los esfuerzos residuales generados por el trabajo en frío pueden no ser siempre deseables y pueden mitigarse por medio de un tratamiento térmico conocido como **recocido para atenuar esfuerzos** (sección 8-6). Como se explicará en breve, en algunos casos, se crean de manera deliberada esfuerzos de compresión residuales en la superficie de los materiales para mejorar sus propiedades mecánicas.

Los esfuerzos residuales no son uniformes a lo largo del material metálico deformado. Por ejemplo, pueden presentarse esfuerzos residuales de compresión altos en la superficie de la placa laminada y pueden almacenarse en el centro esfuerzos a la tensión altos. Si se maquina una pequeña cantidad de metal de una superficie de una pieza trabajada en frío, se elimina el metal que sólo contiene esfuerzos residuales de compresión. Para restaurar el balance, la placa debe distorsionarse. Si existe un esfuerzo residual de compresión neto en la superficie de un componente, esto puede ser benéfico para las propiedades mecánicas dado que cualquier grieta o fisura en la superficie es probable que no crezca. Éstas son las razones de por qué cualquier esfuerzo residual, originado a partir del trabajo en frío o cualquier otra fuente, afecta la habilidad de la pieza para soportar una carga (figura 8-11). Si se aplica un esfuerzo a la tensión a un material que ya contiene esfuerzos residuales de tensión, el esfuerzo total que actúa sobre la pieza es la suma de los esfuerzos aplicados y residuales. Sin embargo, si se almacenan esfuerzos de compresión en la superficie de una pieza metálica, un esfuerzo a la tensión aplicado debe balancear primero los esfuerzos residuales de compresión. Ahora la pieza puede ser capaz de soportar una carga mayor a la normal. En el capítulo 7 se aprendió que la fatiga es un mecanismo de falla común para componentes de soporte de carga. En algunas ocasiones, los componentes que están sujetos a falla por fatiga pueden endurecerse por **granallado**. Al bombardear la superficie con bolas de acero disparadas a una velocidad alta se introducen esfuerzos residuales de compresión en la superficie que incrementan la resistencia de la superficie metálica a la falla por fatiga (capítulo 7). El siguiente ejemplo explica el uso del granallado.

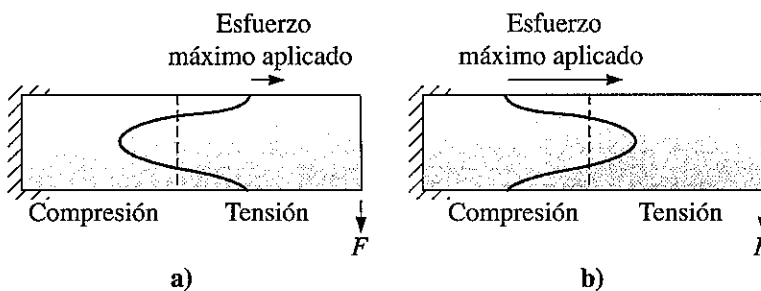


Figura 8-11 Los esfuerzos residuales pueden ser dañinos o benéficos. a) Una fuerza de flexión aplica un esfuerzo a la tensión sobre la parte superior de la viga. Dado que ya existen esfuerzos residuales a la tensión en la parte superior, las características de soporte de carga son malas. b) La parte superior contiene esfuerzos residuales de compresión. Ahora las características de soporte de carga son muy buenas.

Ejemplo 8-3**Diseño de una flecha resistente a la fatiga**

Su compañía ha producido varios miles de flechas que tienen una resistencia a la fatiga de 20 000 psi. Las flechas se sujetan a cargas de flexión altas durante su rotación. Sus ingenieros de ventas reportan que las primeras flechas colocadas en servicio fallaron en un corto periodo por fatiga. Diseñe un proceso por medio del cual puedan salvarse las flechas restantes mejorando sus propiedades de fatiga.

SOLUCIÓN

Las fallas por fatiga por lo regular comienzan en la superficie de una pieza giratoria; por tanto, el incremento de la resistencia en la superficie mejora la vida a fatiga de la flecha. Podría utilizarse una variedad de métodos para lograr esto.

Si la flecha está hecha de acero, se podría carburizar la superficie de la pieza (capítulo 5). En la carburación se difunde carbono en la superficie de la flecha. Después de un tratamiento térmico apropiado, el contenido mayor de carbono en la superficie incrementa la resistencia de la superficie y, quizás más importante, introduce esfuerzos residuales de *compresión* en la superficie.

Podría considerarse trabajar en frío la flecha; el trabajo en frío incrementa la resistencia a la fluencia del metal y, si se realiza de manera apropiada, introduce esfuerzos residuales de compresión. El trabajo en frío también reduce el diámetro de la flecha y, debido al cambio dimensional, la flecha podría no ser capaz de desempeñar su función.

Otra alternativa es granallar la flecha. El granallado introduce esfuerzos residuales de compresión locales en la superficie sin modificar las dimensiones de la pieza. Este proceso, el cual también es económico, podría ser suficiente para salvar las flechas restantes.

Templado y recocido de vidrios

Los esfuerzos residuales originados durante el enfriamiento de los vidrios son de interés considerable. Se puede tratar con los esfuerzos residuales en los vidrios de dos maneras. Primero, se puede volver a calentar el vidrio a una temperatura alta conocida como *punto de recocido* (de $\sim 450^\circ\text{C}$ para los vidrios de silicato con una viscosidad de $\sim 10^{13}$ poises) y enfriarla de manera lenta de tal manera que se enfríe por dentro y por fuera a aproximadamente la misma rapidez. El vidrio resultante tendrá poco o ningún esfuerzo residual. A este proceso se le conoce como **recocido**, y el vidrio resultante que está casi libre de esfuerzo se conoce como **vidrio recocido**. El propósito del recocido de vidrios y el proceso conocido como recocido de alivio de esfuerzo en los materiales metálicos es el mismo (es decir, eliminar o disminuir de manera significativa el nivel de esfuerzo residual). Sin embargo, el origen del esfuerzo residual es diferente para estos materiales. Otra opción que se tiene en el procesamiento de vidrios es conducir un tratamiento térmico que conduzca a esfuerzos de compresión sobre la superficie de un vidrio; a esto se le conoce como **templado**. Al vidrio resultante se le conoce como vidrio templado. El **vidrio templado** se obtiene calentando el vidrio a una temperatura justo debajo del punto de recocido, después, dejando de manera deliberada que la superficie se enfríe con mayor rapidez que el centro. Esto conduce a un esfuerzo de compresión uniforme en la superficie del vidrio. La región central permanece bajo un esfuerzo a la tensión. También es posible intercambiar iones en la estructura del vidrio e introducir un esfuerzo de compresión. A esto se le conoce como *templado químico*. En el capítulo 7 se vio que la resistencia del vidrio depende de las imperfecciones en la superficie. Si se tiene un esfuerzo de compresión en la superficie del vidrio y un esfuerzo a la tensión en el centro (de tal manera que se tiene un esfuerzo total de cero), la resistencia del vidrio se mejora de manera significativa. Cualquier microgrieta presente no crecerá con rapidez, debido a la presencia de un esfuerzo de compresión neto sobre la superficie del vidrio. Sin embargo, si se crea un gran impacto, entonces la grieta penetra a través de la región donde el esfuerzo es de compresión y el vidrio se hace pedazos.

Los vidrios templados tienen varios usos. Por ejemplo, los paneles de ventanas laterales y traseras de automóviles se fabrican utilizando vidrio templado. Las aplicaciones como pantallas para chimenea, hornos, estanterías, mobiliario y refrigeradores también usan vidrio templado. Para los parabrisas en los automóviles en la parte frontal se utiliza **vidrio laminado de seguridad**. El vidrio del parabrisas frontal está hecho de dos piezas de vidrio recocido laminadas utilizando un plástico conocido como butiral de polivinilo (PVB). Si el vidrio del parabrisas se rompe, las piezas de vidrio laminadas se mantienen unidas entre sí por medio del plástico PVB. Esto ayuda a minimizar las heridas al conductor y pasajeros. También, el uso del vidrio laminado de seguridad reduce la probabilidad de que las piezas de vidrio corten los tejidos de las bolsas de aire que es probable que se desplieguen de manera simultánea.

8-5 Características del trabajo en frío

Existen varias ventajas y limitaciones al endurecer un material metálico por medio de trabajo en frío o endurecimiento por deformación.

- Se puede endurecer el material metálico y producir la forma final deseada de manera simultánea.
- Se pueden obtener excelentes tolerancias dimensionales y acabados de superficie por medio del proceso de trabajo en frío.
- El proceso de trabajo en frío puede ser un método económico para producir grandes números de piezas pequeñas.
- Algunos metales, tal como el magnesio CH, tienen un número limitado de sistemas de deslizamiento y son bastante quebradizos a temperatura ambiente; por tanto, sólo puede lograrse un grado pequeño de trabajo en frío.
- El trabajo en frío afecta la ductilidad, la conductividad eléctrica y la resistencia a la corrosión. Dado que el trabajo en frío reduce la conductividad eléctrica en menor grado que otros procesos de endurecimiento, como la introducción de elementos aleantes (figura 8-12), el trabajo en frío es una manera satisfactoria para endurecer materiales conductores, como los alambres de cobre utilizados para la transmisión de energía eléctrica.

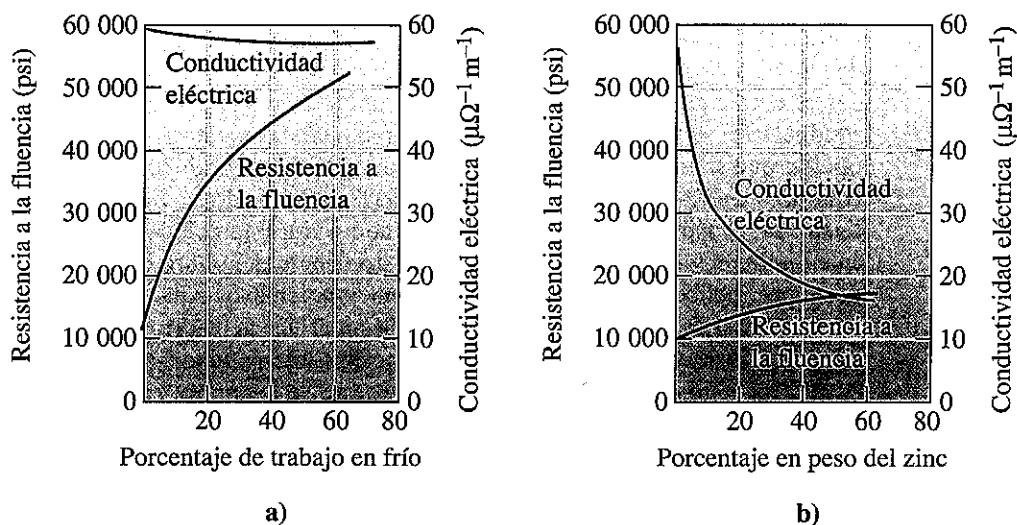


Figura 8-12 Comparación del endurecimiento del cobre por medio de a) trabajo en frío y b) aleación con zinc. Observe que el trabajo en frío produce un endurecimiento mayor, pero tiene poco efecto sobre la conductividad eléctrica.

- Los esfuerzos residuales controlados de manera apropiada y el comportamiento anisotrópico pueden ser benéficos; sin embargo, si los esfuerzos residuales no se controlan de manera adecuada, las propiedades de los materiales disminuyen en gran medida.
- Como se verá en la sección 8-6, dado que el efecto del trabajo en frío disminuye o se elimina a temperaturas altas, no se puede utilizar el trabajo en frío como un mecanismo de endurecimiento para componentes que estarán sujetos a temperaturas altas durante la aplicación o servicio.
- Algunas técnicas de procesamiento de deformación pueden lograrse sólo si ocurre el trabajo en frío. Por ejemplo, el trefilado de alambres requiere que se pase una barra a través de un dado para producir un área más pequeña de la sección transversal (figura 8-13). Para una fuerza de trefilado dada F_d , se produce un esfuerzo diferente en el alambre original y final. El esfuerzo sobre el alambre inicial debe exceder la resistencia a la fluencia del metal para ocasionar deformación. El esfuerzo sobre el alambre final debe ser menor que su resistencia a la fluencia para prevenir la falla. Esto se logra sólo si se endurece por deformación el alambre durante el trefilado.

$$\text{Esfuerzo} = \frac{F_d}{\frac{\pi d_0^2}{4}} > \text{Resistencia a la fluencia original} \quad \text{Esfuerzo} = \frac{F_d}{\frac{\pi d_f^2}{4}} < \text{Resistencia a la fluencia final}$$


Figura 8-13 Proceso del trefilado de alambres. La fuerza F_d actúa sobre los diámetros original y final. Por tanto, el esfuerzo producido en el alambre final es mayor que en el original. Si el alambre no se endureciera por deformación durante el trefilado, el alambre final se rompería antes de que se hubiera podido pasar el alambre original a través del dado.

Ejemplo 8-4

Diseño de un proceso de trefilado de alambre

Diseñe un proceso para producir alambre de cobre de 0.20 pulg de diámetro. Las propiedades mecánicas del cobre se muestran en la figura 8-7.

SOLUCIÓN

El trefilado de alambre es la técnica de fabricación obvia para esta aplicación. Para producir el alambre de cobre de la manera más eficiente posible, se debe realizar la mayor reducción posible en el diámetro. El diseño debe asegurar que el alambre se endurezca por deformación lo suficiente durante el trefilado para prevenir que el alambre trefilado se rompa.

Como cálculo de ejemplo, se supone que el diámetro inicial del alambre de cobre es de 0.40 pulg y que el alambre está en su condición más blanda posible. El trabajo en frío es

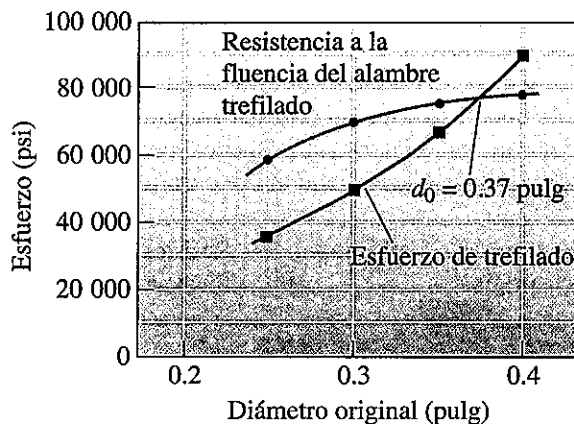
$$\begin{aligned} \% \text{ TF} &= \left[\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right] \times 100 = \left[\frac{(\pi/4)d_0^2 - (\pi/4)d_f^2}{(\pi/4)d_0^2} \right] \times 100 \\ &= \left[\frac{(0.40 \text{ pulg})^2 - (0.20 \text{ pulg})^2}{(0.40 \text{ pulg})^2} \right] \times 100 = 75\% \end{aligned}$$

A partir de la figura 8-7, la resistencia a la fluencia inicial con 0% de trabajo en frío es de 22 000 psi. La resistencia a la fluencia final con 75% de trabajo en frío es de alrededor de 80 000 psi (con muy poca ductilidad). La fuerza de trefilado requerida para deformar el alambre inicial es:

$$F = \sigma_y A_0 = (22\,000 \text{ psi})(\pi/4)(0.40 \text{ pulg})^2 = 2765 \text{ lb}$$

TABLA 8-3 ■ Propiedades mecánicas del alambre de cobre (vea el ejemplo 8-4)

d_0 (pulg)	% de TF	Resistencia a la fluencia del alambre trefilado	Fuerza (pulg)	Esfuerzo de trefilado sobre el alambre (psi)
0.25	36	58 000	1080	34 380
0.30	56	70 000	1555	49 500
0.35	67	74 000	2117	67 380
0.40	75	80 000	2765	88 000

Figura 8-14
Resistencia a la fluencia y
esfuerzo de trefilado del alambre
(para el ejemplo 8-4).

El esfuerzo que actúa sobre el alambre después de pasar a través del dado es:

$$\sigma = \frac{F_d}{A_f} = \frac{2765 \text{ lb}}{(\pi/4)(0.20 \text{ pulg})^2} = 88\,000 \text{ psi}$$

El esfuerzo aplicado de 88 000 psi es mayor que la resistencia a la fluencia de 80 000 del alambre trefilado. Por tanto, el alambre se rompe dado que el porcentaje de elongación es casi cero.

Se puede realizar el mismo conjunto de cálculos para otros diámetros iniciales, con los resultados mostrados en la tabla 8-3 y en la figura 8-14.

La gráfica muestra que el esfuerzo de trefilado excede la resistencia a la fluencia del alambre trefilado cuando el diámetro original es alrededor de 0.37 pulg. Para producir el alambre de la manera más eficiente posible, el diámetro original debe estar justo debajo de 0.37 pulg.

8-6

Las tres etapas del recocido

El trabajo en frío es un mecanismo de endurecimiento útil y es una herramienta efectiva para conformar materiales utilizando el trefilado de alambre, el laminado, la extrusión, etc. En algunas ocasiones, el trabajo en frío conduce a algunos efectos que en ocasiones no son deseables. Por ejemplo, la pérdida de ductilidad o el desarrollo de esfuerzos residuales pueden no ser deseables para ciertas aplicaciones. Dado que el trabajo en frío o endurecimiento por deformación resulta del incremento en la densidad de las dislocaciones, se puede suponer que cualquier tratamiento para recomodar o eliminar las dislocaciones invierte los efectos del trabajo en frío.

El **recocido** es un tratamiento térmico utilizado para eliminar algunos o todos los efectos del trabajo en frío. Puede utilizarse el recocido a temperatura baja para eliminar los esfuerzos residuales producidos durante el trabajo en frío sin afectar las propiedades mecánicas de la pieza finalizada, o puede utilizarse el recocido para eliminar por completo el endurecimiento

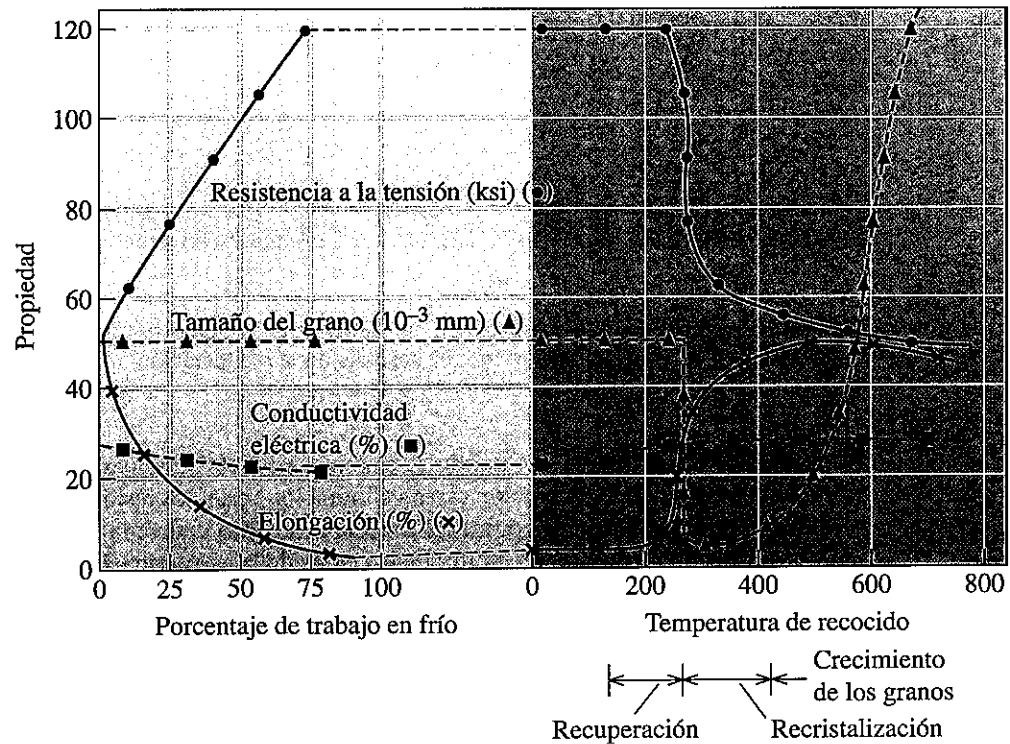


Figura 8-15 Efecto del trabajo en frío sobre las propiedades de una aleación de Cu-35% Zn y el efecto de la temperatura de recocido sobre las propiedades de una aleación de Cu-35% Zn que está 75% trabajada en frío.

por deformación alcanzado durante el trabajo en frío. En este caso, la parte final es blanda y dúctil pero sigue teniendo un acabado de superficie y precisión dimensional buenos. Después del recocido, se puede realizar un trabajo en frío adicional dado que la ductilidad se restaura; al combinar ciclos de repetición de trabajo en frío y recocido, pueden alcanzarse deformaciones totales grandes. Existen tres etapas posibles en el proceso de recocido; en la figura 8-15 se muestran sus efectos sobre las propiedades del latón.

Observe que el término “recocido” también se utiliza para describir otros tratamientos térmicos. Por ejemplo, los vidrios pueden recocerse, o tratarse de manera térmica, para eliminar los esfuerzos residuales. Los hierros colados y los aceros pueden recocerse para producir una ductilidad máxima, aun cuando no se le haya realizado un trabajo en frío previo al material. En capítulos posteriores se explicarán estos tratamientos térmicos de recocido.

Recuperación La microestructura original trabajada en frío está compuesta de granos deformados que contienen un gran número de dislocaciones enredadas. Cuando se calienta primero el metal, la energía térmica adicional permite que las dislocaciones se muevan y formen los límites de una **estructura subgranular poligonizada** (figura 8-16). Sin embargo, la densidad de las dislocaciones permanece virtualmente sin cambiar. Este tratamiento a temperatura baja elimina los esfuerzos residuales debidos al trabajo en frío sin ocasionar un cambio en la densidad de las dislocaciones y se le llama **recuperación**.

Las propiedades mecánicas del metal permanecen relativamente sin cambiar debido a que no se reduce el número de dislocaciones durante la recuperación. Dado que se reducen o incluso se eliminan los esfuerzos residuales cuando se reacomodan las dislocaciones, a la recuperación con frecuencia se le llama **recocido de alivio de esfuerzo**. Además, la recuperación restaura la conductividad eléctrica alta del metal, lo que permite fabricar alambre de cobre o aluminio para la transmisión de energía eléctrica que sea resistente pero que siga teniendo una conductividad alta. Por último, la recuperación con frecuencia mejora la resistencia a la corrosión del material.

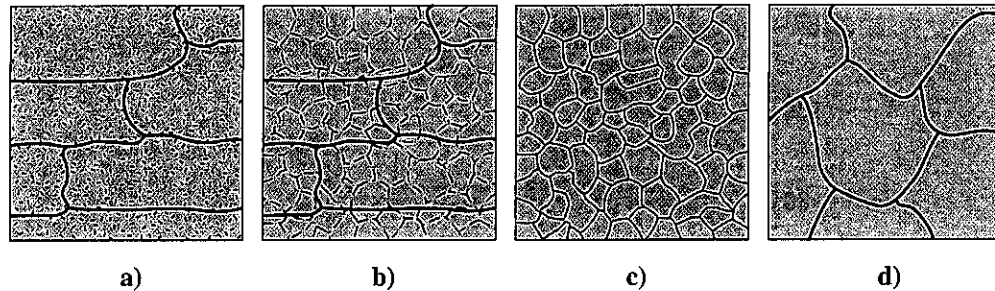


Figura 8-16 Efecto de la temperatura de recocido sobre la microestructura de los metales trabajados en frío. a) Trabajado en frío, b) después de la recuperación, c) después de la recrystalización y d) después del crecimiento de los granos.

Recrystalización Cuando se calienta un metal trabajado en frío por encima de cierta temperatura, la recuperación rápida elimina los esfuerzos residuales y produce la estructura de las dislocaciones polygonizada. En este momento ocurre la formación de núcleos de nuevos granos pequeños en los límites de la celdas de la estructura polygonizada, eliminando la mayoría de las dislocaciones (figura 8-16). Debido a que el número de dislocaciones se reduce en gran medida, el metal recrystalizado tiene una resistencia baja pero una ductilidad alta. A la temperatura a la que aparece una microestructura de nuevos granos que tienen una densidad de dislocaciones muy baja se le conoce como **temperatura de recrystalización**. Al proceso de formación de nuevos granos por medio del tratamiento térmico a un material trabajado en frío se le conoce como **recrystalización**. Como se verá en la sección 8-7, la temperatura de recrystalización depende de diversas variables y no es una temperatura fija.

Crecimiento de granos A temperaturas de recocido aún más altas, la recuperación y la recrystalización ocurren de manera rápida, produciendo una estructura granular recrystalizada fina. Si la temperatura es lo suficientemente alta, los granos comienzan a crecer, con granos favorecidos que eliminan a los granos más pequeños (figura 8-17). Este fenómeno, llamado *crecimiento de granos*, se lleva a cabo por medio de la reducción en el área de los límites de los granos y se describió en el capítulo 5. Ilustrada para una aleación de cobre-zinc en la figura 8-15, el crecimiento de los granos casi siempre es indeseable. Recuerde que el creci-

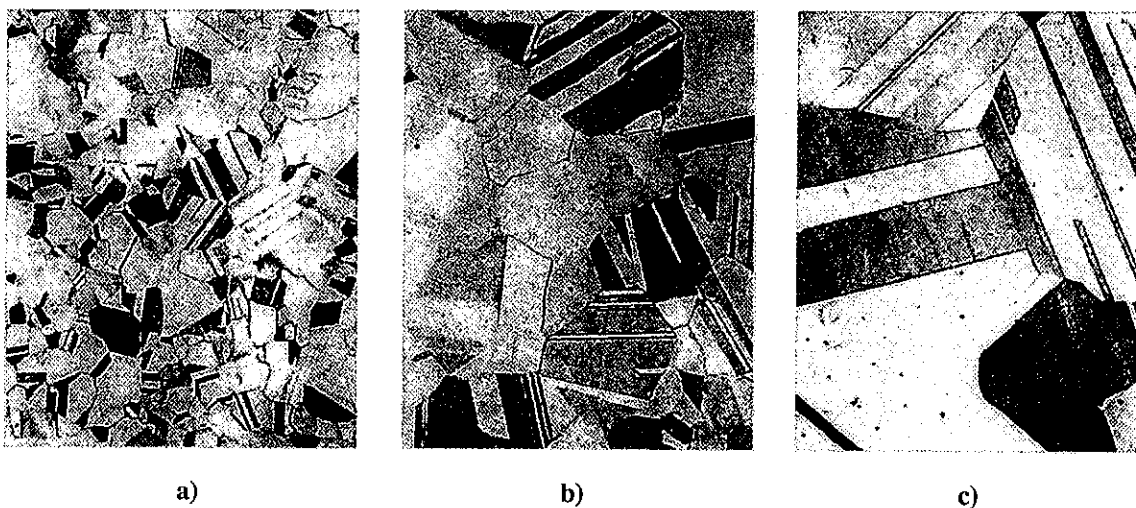


Figura 8-17 Fotomicrografía que muestra el efecto de la temperatura de recocido sobre el tamaño de los granos en el latón. También pueden observarse límites de macla en las estructuras. a) Recocido a 400 °C, b) recocido a 650 °C y c) recocido a 800 °C (75×). (Adaptada de Brick, R. y Phillips, A., *The Structure and Properties of Alloys*, 1949, McGraw-Hill.)

miento de granos ocurrirá en la mayoría de los materiales si se sujetan a una temperatura lo suficientemente alta y, como tal, no está relacionado con el trabajo en frío. Por tanto, la recrystalización o la recuperación no son necesarias para que ocurra el crecimiento de granos.

Es posible que sepa que las bombillas de luz incandescente contienen filamentos fabricados de tungsteno (W). La temperatura de operación alta ocasiona el crecimiento de granos y es uno de los factores que conducen a la falla del filamento.

Los materiales cerámicos, los cuales por lo general no muestran ningún endurecimiento por deformación significativo, muestran una cantidad considerable de crecimiento de granos (capítulo 5). También, puede ocurrir un crecimiento anormal de granos en algunos materiales como resultado de una formación de fase líquida durante la sinterización (véase el capítulo 15). En algunas ocasiones el crecimiento de granos es deseable, como es el caso de las cerámicas de alúmina para la fabricación de materiales ópticos utilizados en el alumbrado. En esta aplicación se desean granos muy grandes dado que tiene que minimizarse la dispersión de la luz de los límites de granos. Algunos investigadores también han desarrollado métodos para el crecimiento de monocristales de materiales cerámicos empleando el crecimiento de granos.

8-7 Control del recocido

En muchas aplicaciones de materiales metálicos se necesita una combinación de resistencia y tenacidad. Por tanto, se deben diseñar procesos que involucren el moldeo por medio de trabajo en frío. Después se necesita controlar el proceso de recocido con el fin de obtener la ductilidad deseada. Para diseñar un tratamiento térmico de recocido apropiado se necesitan conocer la temperatura de recrystalización y el tamaño de los granos recrystalizados.

Temperatura de recrystalización Ésta es la temperatura a la que los granos en la microestructura trabajada en frío comienzan a transformarse en granos equiaxiales nuevos y libres de dislocaciones. La fuerza motriz para la recrystalización es la diferencia en la energía interna entre un material trabajado en frío y un material recrystalizado. Es importante enfatizar que la temperatura de recrystalización *no* es una temperatura fija, como la temperatura de fusión de un elemento puro, y está influida por diversas variables del procesamiento:

- La temperatura de recrystalización disminuye cuando la cantidad de trabajo en frío aumenta. Cantidades mayores de trabajo en frío hacen al metal menos estable y propician la nucleación de los granos recrystalizados. Existe una cantidad mínima de trabajo en frío, alrededor del 30 al 40%, debajo de la cual no ocurrirá la recrystalización.
- Un tamaño menor inicial de los granos trabajados en frío reduce la temperatura de recrystalización al proveer más sitios —los antiguos límites de los granos— en los que pueden nuclearse nuevos granos.
- Los metales puros se recrystalizan a temperaturas más bajas que las aleaciones.
- El aumento del tiempo de recocido disminuye la temperatura de recrystalización (figura 8-18) dado que se dispone de más tiempo para la nucleación y el crecimiento de los nuevos granos recrystalizados.
- Las aleaciones con puntos de fusión más altos tienen una temperatura de recrystalización más alta. Dado que la recrystalización es un proceso controlado por difusión, la temperatura de recrystalización es casi proporcional a $0.4T_f$ (kelvin). En la tabla 8-4 se muestran las temperaturas de recrystalización comunes para los metales seleccionados.

El concepto de temperatura de recrystalización es muy importante dado que también define el límite entre el trabajo en frío y el trabajo en caliente de un material metálico. Si se lleva a cabo la deformación (moldeo) de un material por encima de la temperatura de recr-

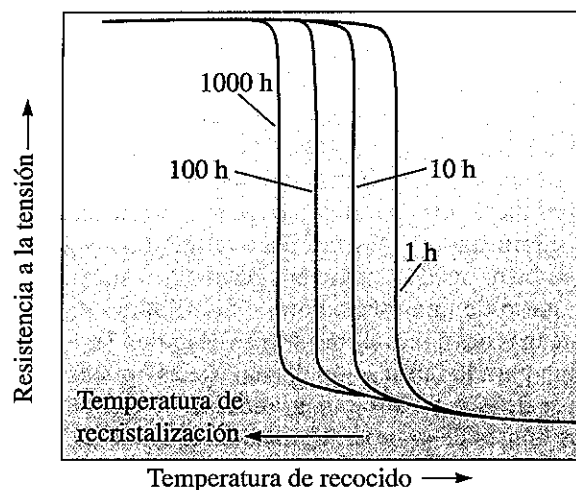


Figura 8-18

Los tiempos de recocido más extensos disminuyen la temperatura de recrystalización. Observe que la temperatura de recrystalización no es una temperatura fija.

TABLA 8-4 ■ Temperaturas típicas de recrystalización para metales seleccionados

Metal	Temperatura de fusión (°C)	Temperatura de recrystalización (°C)
Sn	232	-4
Pb	327	-4
Zn	420	10
Al	660	150
Mg	650	200
Ag	962	200
Cu	1085	200
Fe	1538	450
Ni	1453	600
Mo	2610	900
W	3410	1200

(Structure and Properties of Engineering Materials, cuarta edición por Brick, Pense, Gordon. Copyright 1977 por McGraw-Hill Companies Inc.-Books. Reproducida con permiso de McGraw-Hill Companies Inc.-Books en el formato de libro de texto por medio del Copyright Clearance Center).

talización, se refiere a esto como trabajo en caliente. Si se conduce el moldeo o deformación a una temperatura por debajo de la temperatura de recrystalización, se refiere a esto como trabajo en frío. Como puede observarse en la tabla 8-4, para el plomo (Pb) o el estaño (Sn) deformados a 25 °C, ¡se está llevando a cabo un trabajo en caliente! Ésta es la razón de por qué el hierro (Fe) puede trabajarse en frío a temperatura ambiente pero el plomo (Pb) o el estaño (Sn) no. Para que el tungsteno (W) se deforme a 1000 °C, ¡se está llevando a cabo un trabajo en frío! En algunos casos, los procesos llevados a cabo por encima de 0.6 veces la temperatura de fusión (T_f) del metal (en K) se consideran como trabajo en caliente. Los procesos llevados a cabo por debajo de 0.3 veces la temperatura de fusión se consideran trabajo en frío y los procesos llevados a cabo entre 0.3 y 0.6 veces T_f se consideran **trabajo en tibio**. Sin embargo, estas descripciones de intervalos que definen el trabajo en caliente, en frío y en tibio, son aproximadas y deben emplearse con cuidado.

Tamaño de los granos recrystalizados

Varios factores influyen en el tamaño de los granos recrystalizados. La reducción de la temperatura de recocido, el tiempo requerido para calentar a la temperatura de recocido o el tiempo de recocido reducen el tamaño de los granos al minimizar la oportunidad del crecimiento de los granos. El aumento del trabajo en frío también reduce el tamaño final de los granos al proveer un gran número de

sitios de nucleación para los nuevos granos. Por último, la presencia de una segunda fase en la microestructura puede fomentar u obstaculizar la recrystalización y el crecimiento de los granos dependiendo de su arreglo y tamaño.

8-8 Recocido y procesamiento de materiales

Los efectos de la recuperación, la recrystalización y el crecimiento de los granos son importantes en el procesamiento y uso eventual de un metal o una aleación.

Procesamiento de deformación Aprovechando el tratamiento térmico de recocido se puede incrementar la cantidad total de deformación que puede lograrse. Si se requiere reducir una placa de 5 pulg de grosor a una hoja de 0.05 pulg de grosor, puede realizarse el trabajo en frío máximo permisible, recocer para restaurar el metal a su condición blanda y dúctil y después trabajar en frío de nuevo. Se puede repetir el ciclo de trabajo en frío-recocido hasta que se aproxime al grosor apropiado. Puede diseñarse la etapa final de trabajo en frío para que produzca las dimensiones finales y las propiedades requeridas, como en el siguiente ejemplo.

Ejemplo 8-5

Se desea producir una tira de cobre de 0.1 cm de grosor y 6 cm de ancho que tenga al menos una resistencia a la fluencia de 60 000 psi y al menos una elongación del 5%. Sólo se pueden adquirir tiras de 6 cm de ancho en un grosor de 5 cm. Diseñe un proceso que dé como resultado el producto que se necesita. Refiérase a la figura 8-7 como sea necesario.

SOLUCIÓN

En el ejemplo 8-2, se encontró que las propiedades requeridas pueden obtenerse con un trabajo en frío de 40 a 45%. Por tanto, el grosor inicial debe estar entre 0.167 y 0.182 cm y esta materia prima debe ser lo más blanda posible —es decir, en la condición de recocido—. Dado que sólo se pueden adquirir materias primas de 5 cm de grosor, se debe reducir el grosor de las tiras de 5 cm a 0.167 y 0.182 cm, después debe recocerse la tira antes del trabajo en frío final. ¿Pero puede llevarse a cabo de manera exitosa el trabajo en frío de 5 a 0.182 cm?

$$\% \text{ TF} = \left[\frac{t_0 - t_f}{t_0} \right] \times 100 = \left[\frac{5 \text{ cm} - 0.182 \text{ cm}}{5 \text{ cm}} \right] \times 100 = 96.4\%$$

Con base en la figura 8-7, se permite un máximo de alrededor de 90% de trabajo en frío. Por tanto, se debe realizar una serie de ciclos de trabajo en frío y recocido. Aunque existen varias combinaciones posibles, una es como la que sigue:

1. Trabajar en frío al 80% la tira hasta llegar de 5 a 1 cm:

$$80 = \left[\frac{t_0 - t_f}{t_0} \right] \times 100 = \left[\frac{5 \text{ cm} - t_f}{5 \text{ cm}} \right] \times 100 \text{ o } t_f = 1 \text{ cm}$$

2. Recocer la tira de 1 cm para restaurar la ductilidad. Si no se conoce la temperatura de recrystalización, se puede utilizar la relación $0.4T_f$ para obtener un estimado. El punto de fusión del cobre es de 1085 °C:

$$T_r \cong (0.4)(1085 + 273) = 543 \text{ K} = 270 \text{ °C}$$

3. Trabajar en frío la tira de 1 a 0.182 cm:

$$\% \text{ TF} = \left[\frac{1 \text{ cm} - 0.182 \text{ cm}}{1 \text{ cm}} \right] \times 100 = 81.8\%$$

4. Recocer de nuevo el cobre a 270 °C para restaurar la ductilidad.
5. Por último, trabajar en frío al 45% de 0.182 cm a la dimensión final de 0.1 cm. Este proceso da las dimensiones finales y las propiedades correctas.

Servicio a temperaturas altas Como se mencionó anteriormente, ni el endurecimiento por deformación ni el endurecimiento por tamaño de los granos (ecuación de Hall-Petch, capítulo 4) son apropiadas para una aleación que se va a utilizar a temperaturas elevadas, como en las aplicaciones resistentes a la termofluencia. Cuando se coloca en servicio a una temperatura alta el metal trabajado en frío, la recrystalización ocasiona de inmediato una disminución catastrófica de la resistencia. Además, si la temperatura es lo suficientemente alta, la resistencia continúa disminuyendo debido al crecimiento de los granos recién recrystalizados.

Procesos de unión Los materiales metálicos pueden unirse utilizando procesos tales como la soldadura. Cuando se une un metal trabajado en frío utilizando un proceso de soldadura, el metal adyacente a la soldadura se calienta por encima de las temperaturas de recrystalización y de crecimiento de granos y posteriormente se enfría de manera lenta. A esta región se le llama **zona afectada por el calor (ZAC)**. En la figura 8-19 se muestran la estructura y las propiedades en la zona afectada por el calor de una soldadura. Las propiedades mecánicas se reducen de manera catastrófica por el calor del proceso de soldadura.

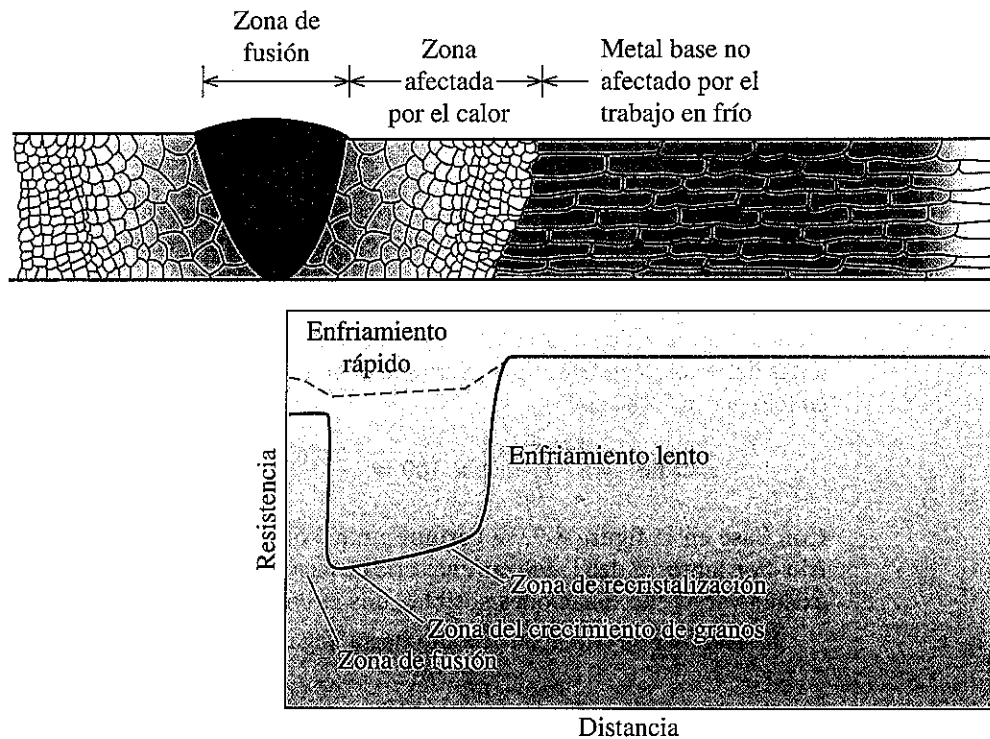


Figura 8-19 Estructura y propiedades que rodean una soldadura de fusión en un metal trabajado en frío. Sólo se marca en el diagrama el lado derecho de la zona afectada por el calor. Observe la pérdida en resistencia ocasionada por la recrystalización y el crecimiento de granos en la zona afectada por el calor.

Los procesos de soldadura, como la soldadura con haz de electrones o la soldadura con láser, los cuales proveen rapidezces altas de entrada de calor por breves periodos, y, por tanto, posteriormente se enfrían rápido, minimizan la exposición de los materiales metálicos a temperaturas por encima de la de recrystalización y disminuyen este tipo de daño. De manera similar un proceso conocido como soldadura de agitación con fricción no provee casi ninguna ZAC y se utiliza de manera comercial para la soldadura de aleaciones de aluminio. En el capítulo 9 se explicará a mayor detalle el proceso de unión de metales

8-9 Trabajo en caliente

Es posible darle forma útil a un metal por medio del trabajo en caliente en vez de por trabajo en frío. Como se describió anteriormente, el trabajo en caliente se define como la deformación de manera plástica del material metálico a una temperatura por encima de la temperatura de recrystalización. Durante el trabajo en caliente, el material metálico se recrystaliza de manera continua (figura 8-20). Como se mencionó anteriormente, a temperatura ambiente el plomo (Pb) está muy por encima de su temperatura de recrystalización de -4°C y por tanto, el Pb no se endurece por deformación y permanece blando y dúctil a temperatura ambiente.

Ausencia de endurecimiento No ocurre endurecimiento durante la deformación por trabajo en caliente; en consecuencia, la cantidad de deformación plástica es casi ilimitada. Una placa muy gruesa puede reducirse a una hoja delgada en una serie continua de operaciones. Las primeras etapas en el proceso se llevan a cabo muy por encima de la temperatura de recrystalización para aprovechar la menor resistencia del material metálico. La última etapa se lleva a cabo justo por encima de la temperatura de recrystalización, utilizando un porcentaje de deformación grande para producir el tamaño de grano más fino posible.

El trabajo en caliente es muy adecuado para la formación de piezas grandes, dado que el metal tiene una resistencia a la fluencia baja y una ductilidad alta a temperaturas elevadas. Además, los metales CH como el magnesio tienen más sistemas de deslizamiento activos a temperaturas de trabajo en caliente; la ductilidad mayor permite deformaciones más grandes que las posibles por medio del trabajo en frío. El siguiente ejemplo ilustra el diseño de un proceso de trabajo en caliente.

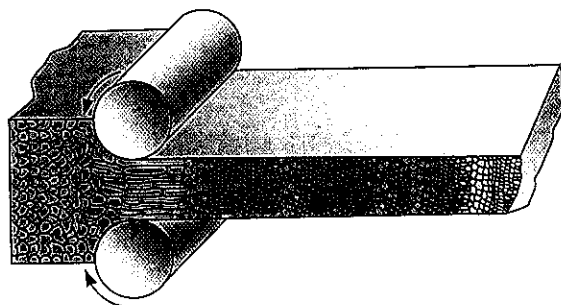


Figura 8-20 Durante el trabajo en caliente los granos anisotrópicos alargados se recrystalizan de manera inmediata. Si se controla de manera apropiada la temperatura del trabajo en caliente, el tamaño final de los granos trabajados en caliente puede ser muy fino.

Ejemplo 8-6**Diseño de un proceso para producir una tira de cobre**

Se desea producir una tira de cobre de 0.1 cm de grosor y 6 cm de ancho que tenga al menos una resistencia a la fluencia de 60 000 psi y un mínimo de elongación del 5%. Sólo se pueden adquirir tiras de 6 cm de ancho en grosores de 5 cm. Diseñe un proceso para lograr el producto que se necesita, pero en menos etapas que las requeridas en el ejemplo 8-5.

SOLUCIÓN

En el ejemplo 8-5, se empleó una serie de ciclos de trabajo en frío-recocido para obtener el grosor requerido. Se pueden reducir las etapas por medio del laminado en caliente al grosor intermedio requerido:

$$\% \text{ TC} = \left[\frac{t_0 - t_f}{t_0} \right] \times 100 = \left[\frac{5 \text{ cm} - 0.182 \text{ cm}}{5 \text{ cm}} \right] \times 100 = 96.4\%$$

$$\% \text{ TC} = \left[\frac{t_0 - t_f}{t_0} \right] \times 100 = \left[\frac{5 \text{ cm} - 0.167 \text{ cm}}{5 \text{ cm}} \right] \times 100 = 96.7\%$$

Observe que las fórmulas para el trabajo en caliente y en frío son las mismas.

Debido a que la recristalización ocurre de manera simultánea con el trabajo en caliente, se pueden obtener estas deformaciones grandes y no se requiere un tratamiento de recocido por separado. Por tanto, el diseño podría ser

1. Trabajar en caliente al 96.4% la tira de 5 cm al grosor intermedio de 0.182 cm.
2. Trabajar en frío al 45% de 0.182 cm a la dimensión final de 0.1 cm. Este diseño da las dimensiones y las propiedades correctas.

Eliminación de imperfecciones Algunas imperfecciones en el material metálico original pueden eliminarse o minimizar sus efectos. Los poros gaseosos pueden cerrarse y soldarse durante el trabajo en caliente—el pliegue interno formado cuando se cierra el poro se elimina por difusión durante el proceso de formación y enfriamiento—. Las diferencias en la composición en el metal pueden reducirse a medida que el trabajo en caliente acerca más la superficie y el centro de la placa, por tanto reduciendo las distancias de difusión.

Comportamiento anisotrópico Las propiedades finales en las piezas trabajadas en caliente *no* son isotrópicas. Los rodillos o moldes de formación, los cuales por lo general están a una temperatura menor que la del metal, enfrían la superficie más rápido que el centro de la pieza. La superficie tiene entonces un tamaño de grano más fino que el centro. Además, se produce una estructura fibrosa debido a que las inclusiones y las partículas de la segunda fase se alargan en la dirección del trabajo.

Acabado superficial y precisión dimensional El acabado superficial formado durante el trabajo en caliente por lo regular es más deficiente que el obtenido por medio del trabajo en frío. El oxígeno reacciona con frecuencia con el metal en la superficie para formar óxidos, los cuales son forzados en la superficie durante la formación. Los aceros y otros metales trabajados en caliente con frecuencia se sujetan a un tratamiento de “desoxidación” en el que se emplean ácidos para disolver la escala de óxido. En algunos metales, como el tungsteno (W) y el berilio (Be), el trabajo en caliente debe realizarse en una atmósfera protectora para prevenir la oxidación. Observe que el proceso de formación llevado a cabo sobre materiales que contienen Be requiere medidas protectoras, dado que la inhalación de los materiales que contienen Be es tóxica.

La precisión dimensional también es difícil de controlar durante el trabajo en caliente. Debe considerarse una deformación elástica mayor, dado que el módulo de elasticidad es menor a las temperaturas del trabajo en caliente que a las temperaturas de trabajo en frío. Además, el metal se contrae a medida que se enfría de la temperatura de trabajo en caliente. La combinación de deformación elástica y contracción térmica requiere que la pieza se haga de un tamaño mayor durante la deformación; los moldes de formación deben diseñarse de manera cuidadosa, y el control preciso de la temperatura es necesario si se deben obtener dimensiones exactas.

Resumen

- Las propiedades de los materiales metálicos puede controlarse combinando deformación plástica y tratamientos térmicos.
- Cuando se deforma un material metálico por medio de trabajo en frío, ocurre un endurecimiento por deformación a medida que se introducen dislocaciones adicionales en la estructura. Pueden obtenerse incrementos muy grandes en la resistencia de esta manera. La ductilidad del material metálico endurecido por deformación se reduce.
- El endurecimiento por deformación, además de incrementar la resistencia y la dureza, aumenta los esfuerzos residuales, produce un comportamiento anisotrópico y reduce la ductilidad, la conductividad eléctrica y la resistencia a la corrosión.
- La cantidad de endurecimiento por deformación es limitada debido a la disminución simultánea de la ductilidad; los metales CCCa por lo regular tienen la mejor respuesta al endurecimiento por medio de trabajo en frío.
- El trefilado de alambre, el estampado, el laminado y la extrusión son algunos ejemplos de métodos de fabricación para el moldeo de materiales metálicos. Algunos de los principios fundamentales para estos procesos también pueden utilizarse en la fabricación de materiales poliméricos.
- La recuperación elástica y el efecto Bauschinger son muy importantes en los procesos de fabricación para el moldeo de aceros y otros materiales metálicos. Los diagramas del límite de formación son útiles en la definición de los procesos de moldeo de los materiales metálicos.
- El mecanismo de endurecimiento por deformación no es efectivo a temperaturas elevadas, debido a que los efectos del trabajo en frío son eliminados por la recrystalización.
- El recocido de materiales metálicos es un tratamiento térmico diseñado para eliminar todos, o una porción de, los efectos del endurecimiento por deformación. El proceso de recocido puede involucrar hasta tres etapas.
- La recuperación ocurre a temperaturas bajas, eliminando los esfuerzos residuales y restaurando la conductividad eléctrica sin reducir la resistencia. El "recocido de alivio de esfuerzo" se refiere a esta recuperación.
- La recrystalización ocurre a temperaturas más altas y elimina casi todos los efectos del endurecimiento por deformación. La densidad de las dislocaciones disminuye de manera drástica durante la recrystalización a medida que los nuevos granos forman núcleos y crecen.
- El crecimiento de granos, el cual por lo general debe evitarse, ocurre a temperaturas aún más altas. En los materiales metálicos trabajados en frío, el crecimiento de los granos sigue después de la recuperación y la recrystalización. En los materiales cerámicos, el crecimiento de los granos puede ocurrir debido a las temperaturas altas o a la presencia de una fase líquida durante la sinterización.
- El trabajo en caliente combina la deformación plástica y el recocido en una sola etapa, lo que permite grandes cantidades de deformación plástica sin volver quebradizo el material.

- Los esfuerzos residuales en los materiales necesitan controlarse. En los materiales metálicos trabajados en frío, los esfuerzos residuales pueden eliminarse utilizando un recocido de alivio de esfuerzo.
- El recocido de vidrios conduce a la eliminación de los esfuerzos desarrollados durante el enfriamiento. El templado térmico de vidrios es un tratamiento térmico en el que el enfriamiento rápido de manera deliberada de la superficie del vidrio conduce a un esfuerzo de compresión en la superficie. Se utilizan vidrios templados o laminados en aplicaciones donde la seguridad es importante.
- En los materiales metálicos pueden introducirse esfuerzos residuales de compresión utilizando el granallado. Este tratamiento conducirá a un incremento en la vida de fatiga.

Glosario

Análisis de figura de polo Técnica especializada basada en la difracción de rayos x, utilizada para la determinación de la orientación preferida de las películas delgadas, hojas o cristales sencillos.

Efecto Bauschinger Material previamente deformado de manera plástica bajo tensión que muestra una disminución en el esfuerzo de flujo bajo compresión o viceversa.

Endurecimiento por deformación Endurecimiento de un material incrementando el número de dislocaciones por deformación. También conocido como "endurecimiento por trabajo".

Endurecimiento por textura Incremento en la resistencia a la fluencia de un material como resultado de la textura cristalográfica preferida.

Esfuerzos residuales Esfuerzos introducidos en un material durante el procesamiento. Pueden originarse como resultado del trabajo en frío o de la expansión y contracción térmica diferencial. El recocido de alivio de esfuerzo en los materiales metálicos y el recocido de vidrios minimizan los esfuerzos residuales. Se introducen de manera deliberada esfuerzos residuales de compresión en la superficie por medio del templado de vidrios o del granallado de materiales metálicos para mejorar sus propiedades mecánicas.

Estructura subgranular poligonizada Estructura subgranular producida en las primeras etapas del recocido. Los límites de los subgranos son una red de dislocaciones reacomodadas durante el calentamiento.

Exponente del endurecimiento por deformación (n) Parámetro que describe la susceptibilidad de un material al trabajo en frío. Describe el efecto que tiene la deformación sobre la resistencia resultante del material. Un material con un coeficiente del endurecimiento por deformación alto obtiene una resistencia alta con únicamente cantidades pequeñas de deformación.

Extrusión Técnica de procesamiento de deformación en la que se empuja un material a través de una abertura en un dado. Utilizada para materiales metálicos y poliméricos.

Formabilidad Habilidad de un material para estirarse y doblarse sin romperse. Los diagramas de formabilidad describen la habilidad de los materiales para estirarse y doblarse.

Fuente de Frank-Read Dislocación fija que, bajo un esfuerzo aplicado, produce dislocaciones adicionales. Este mecanismo es al menos parcialmente responsable del endurecimiento por deformación.

Granallado Introducción de esfuerzos residuales de compresión en la superficie de una pieza al bombardear la superficie con granalla de acero. Los esfuerzos residuales pueden mejorar el desempeño general del material.

Microscopia de orientación Técnica especializada, con frecuencia basada en la microscopia electrónica de barrido, utilizada para determinar la orientación cristalográfica de los distintos granos en una muestra policristalina.

Procesamiento de deformación Técnicas para la fabricación de materiales metálicos y otros empleando procesos como el laminado, la extrusión, el trefilado, etcétera.

Procesamiento termomecánico Proceso involucrado en la fabricación de componentes metálicos empleando deformación mecánica y varios tratamientos térmicos.

Rapidez de deformación Velocidad a la que se deforma un material.

Recocido En el contexto de los metales el recocido es un tratamiento térmico utilizado para eliminar parte de o todos los efectos del trabajo en frío. Para los vidrios, el recocido es un tratamiento térmico que elimina los esfuerzos inducidos de manera térmica.

Recocido de alivio de esfuerzo Etapa de recuperación del tratamiento térmico de recocido durante la cual se liberan los esfuerzos residuales sin alterar la resistencia y la ductilidad del material.

Recristalización Tratamiento térmico de recocido a temperatura media diseñado para eliminar todos los efectos del endurecimiento por deformación producido durante el trabajo en frío.

Recuperación Tratamiento térmico de recocido a baja temperatura diseñado para eliminar los esfuerzos residuales introducidos durante la deformación sin reducir la resistencia del material trabajado en frío. Éste es el mismo que el recocido de alivio de esfuerzo.

Sensibilidad a la rapidez de deformación (m) Rapidez a la que el esfuerzo cambia como una función de la rapidez de deformación. Un material puede comportarse de manera muy distinta si se prensa de manera lenta en una forma en vez de transformarse de manera rápida en una forma por una carga de impacto.

Temperatura de recristalización Temperatura sobre la que emergen nuevos granos en esencia libres de dislocaciones a partir de un material que se trabajó en frío previamente. Ésta depende de la extensión del trabajo en frío, del tiempo del tratamiento térmico, etc. y no es una temperatura fija.

Templado En el contexto de la fabricación de vidrios, el templado se refiere a un tratamiento térmico que conduce a un esfuerzo de compresión sobre la superficie de un vidrio. Esta capa de esfuerzo de compresión hace al vidrio templado más seguro. En el contexto del procesamiento de materiales metálicos, el templado se refiere a un tratamiento térmico utilizado para ablandar el material e incrementar su tenacidad.

Termoplásticos Clase de polímeros que consisten en moléculas grandes parecidas al espagueti que están enredadas (por ejemplo, el polietileno, el nailon, el PET, etcétera).

Textura fibrosa Orientación preferida de los granos obtenida durante el proceso de trefilado de alambres. Ciertas direcciones cristalográficas en cada grano se alinean con la dirección del trefilado, ocasionando un comportamiento anisotrópico.

Textura laminar Orientación preferida de los granos obtenidos durante el procesamiento de laminado. Ciertas direcciones cristalográficas se alinean con la dirección de laminado y ciertos planos cristalográficos preferidos se vuelven paralelos a la superficie de la hoja.

Trabajo en caliente Deformación de un metal por encima de la temperatura de recristalización. Durante el trabajo en caliente, sólo cambia la forma del metal; la resistencia permanece relativamente sin cambiar debido a que no ocurre endurecimiento por deformación.

Trabajo en frío Deformación de un metal debajo de la temperatura de recristalización. Durante el trabajo en frío el número de dislocaciones aumenta, ocasionando que el metal se endurezca y su forma cambie.

Trabajo en tibio Término utilizado para indicar el procesamiento de materiales metálicos en un intervalo de temperatura que está entre las que definen el trabajo en frío y en caliente (por lo general una temperatura entre 0.3 y 0.6 de la temperatura de fusión en K).

Trefilado Técnica de procesamiento de deformación en la que se jala un material a través de una abertura en un dado (por ejemplo, el trefilado de alambres).

Vidrio laminado de seguridad Dos piezas de vidrio recocido se mantienen unidas entre sí por medio de un plástico como el butiral de polivinilo (PVB). Este tipo de vidrio puede utilizarse en los parabrisas de los automóviles.

Vidrio recocido Vidrio que ha sido tratado por medio del calentamiento sobre la temperatura del punto de recocido (donde la viscosidad del vidrio se vuelve de 10^{13} poises) y después se enfría de manera lenta para minimizar o eliminar los esfuerzos residuales.

Vidrio templado Vidrio, sobre todo para aplicaciones donde la seguridad es particularmente importante, obtenido por medio del tratamiento térmico y enfriamiento rápido o por medio del intercambio químico de iones. El templado resulta en un esfuerzo de compresión neto en la superficie del vidrio.

Zona afectada por el calor (ZAC) Volumen del material adyacente a una soldadura que se calienta durante el proceso de soldadura por encima de alguna temperatura crítica a la que ocurre un cambio en la estructura, como el crecimiento de granos o la recristalización.

Problemas

Sección 8-1 Relación del trabajo en frío con la curva esfuerzo-deformación

- 8-1** Utilizando un diagrama de esfuerzo-deformación, explique qué significa el término “endurecimiento por deformación”.
- 8-2** ¿A qué se refiere el término “recuperación elástica”? ¿Cuál es la importancia de este término desde el punto de vista de la fabricación?
- 8-3** ¿A qué se refiere el término “efecto Bauschinger”?
- 8-4** ¿Qué técnicas de fabricación usan el proceso de trabajo en frío?
- 8-5** Considere las curvas de esfuerzo-deformación a la tensión en la figura 8-21 etiquetada 1 y 2 y responda las siguientes preguntas. Estas curvas son típicas de metales. Considere cada inciso como una pregunta por separado que no tiene relación con los incisos anteriores de la pregunta.

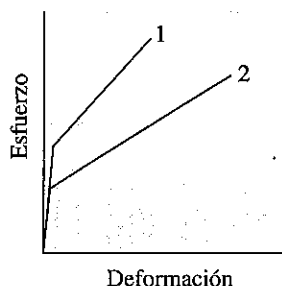


Figura 8-21 Curvas de esfuerzo-deformación (para el problema 8-5).

- a) ¿Qué material tiene el mayor exponente de endurecimiento por trabajo? ¿Cómo lo sabe?
- b) Las muestras 1 y 2 son idénticas a excepción de que se probaron a distintas rapidez de deformación. ¿Qué muestra se probó a la mayor rapidez de deformación? ¿Cómo lo sabe?
- c) Suponga que las dos curvas de esfuerzo-deformación representan pruebas sucesivas de la misma muestra. La muestra se cargó, después se descargó antes de que comenzara el rebajo y después se volvió a cargar. ¿Qué muestra representa la primera prueba: 1 o 2? ¿Cómo lo sabe?
- 8-6** La figura 8-22 es una gráfica del esfuerzo verdadero en función de la deformación verdadera para un metal. Para los esfuerzos impuestos totales de $e = 0.1, 0.2, 0.3$ y 0.4 , determine las componentes elástica y plástica de la de-

mación. El módulo de elasticidad del metal es de 100 GPa.

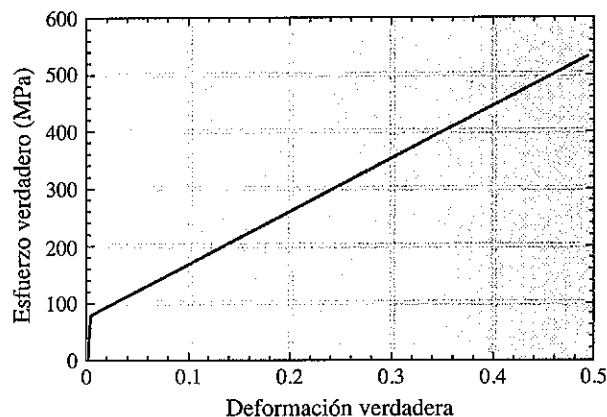


Figura 8-22 Curva del esfuerzo verdadero en función de la deformación verdadera para un metal (problema 8-6).

- 8-7** Una barra metálica de 0.505 pulg de diámetro con una longitud calibrada l_0 de 2 pulg se sometió a una prueba de tensión. Se realizaron las siguientes mediciones en la región plástica:

Fuerza (lb)	Cambio en la longitud calibrada (pulg) (Δl)	Diámetro (pulg)
27 500	0.2103	0.4800
27 000	0.4428	0.4566
25 700	0.6997	0.4343

Determine el exponente del endurecimiento por deformación para el metal. ¿Es más probable que el metal sea CCCa, CCCu o CH? Explique.

- 8-8** Defina los siguientes términos: exponente del endurecimiento por deformación (n), sensibilidad a la rapidez de deformación (m) y razón de la deformación plástica (r). Utilice las ecuaciones apropiadas.
- 8-9** Una barra metálica de 1.5 cm de diámetro con una longitud calibrada l_0 de 3 cm se sometió a una prueba de tensión. Se realizaron las siguientes mediciones:

Fuerza (N)	Cambio en la longitud calibrada (cm)	Diámetro (cm)
16 240	0.6642	1.2028
19 066	1.4754	1.0884
19 273	2.4663	0.9848

Determine el coeficiente del endurecimiento por deformación para el metal. ¿Es más probable que el metal sea CCCa, CCCu o CH? Explique.

8-10 ¿A qué se refiere el término “formabilidad de un material”?

8-11 En la figura 8-23 se muestra una curva de esfuerzo verdadero-deformación verdadera. Determine el exponente del endurecimiento por deformación para el metal.

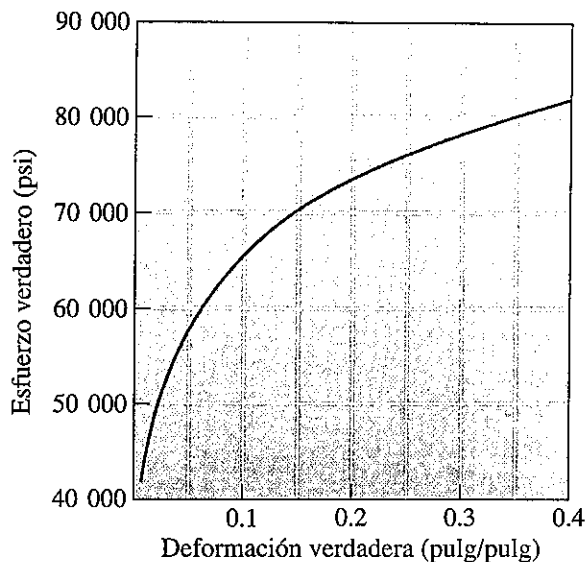


Figura 8-23 Curva de esfuerzo verdadero-deformación verdadera (para el problema 8-11).

8-12 La figura 8-24 muestra una gráfica del logaritmo natural del esfuerzo verdadero en función del logaritmo natural de la deformación verdadera para una aleación de Cu-30% Zn probada en tensión. Sólo se muestra la porción plástica de la curva de esfuerzo-deformación.

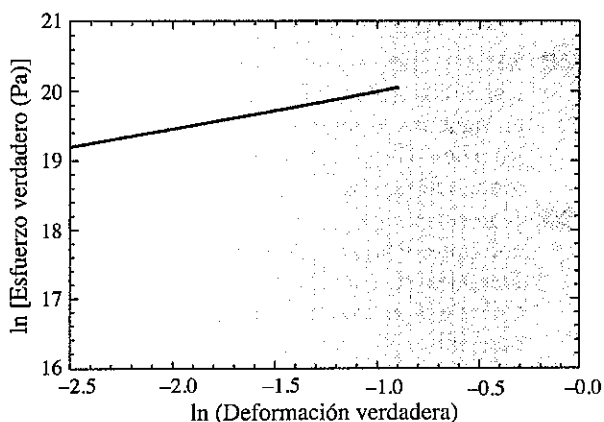


Figura 8-24 Logaritmo natural del esfuerzo verdadero en función del logaritmo natural de la deformación verdadera para una aleación de Cu-30% Zn probada en tensión. Sólo se muestra la porción plástica de la curva de esfuerzo-deformación.

Determine el coeficiente de resistencia K y el exponente del endurecimiento por trabajo n .

8-13 Una barra de tensión de aleación de Cu-30% Zn tiene un coeficiente del endurecimiento por deformación de 0.50. La barra, la cual tiene un diámetro inicial de 1 cm y una longitud calibrada inicial de 3 cm, falla a un esfuerzo ingenieril de 120 MPa. Después de la fractura, la longitud calibrada es de 3.5 cm y el diámetro es de 0.926 cm. No se presenta rebajo. Calcule el esfuerzo verdadero cuando la deformación verdadera es de 0.05 cm/cm.

Sección 8-2 Mecanismos del endurecimiento por deformación

8-14 Explique por qué muchos materiales metálicos exhiben endurecimiento por deformación.

8-15 ¿El mecanismo del endurecimiento por deformación depende del tamaño de los granos? ¿Depende de la densidad de las dislocaciones?

8-16 Compare y contraste el endurecimiento por deformación con el endurecimiento por tamaño de los granos. ¿Qué ocasiona la resistencia al movimiento de las dislocaciones en cada uno de estos mecanismos?

8-17 El endurecimiento por deformación por lo general no es una consideración en los materiales cerámicos. Explique por qué.

8-18 Los polímeros termoplásticos como el polietileno muestran un incremento en la resistencia cuando se sujetan a un esfuerzo. Explique cómo ocurre este fortalecimiento.

8-19 Las botellas de bebidas carbonatadas se fabrican de plástico PET. Explique cómo la cristalización inducida por esfuerzo incrementa la resistencia de las botellas de PET fabricadas por medio del proceso de soplado-estiramiento (véase los capítulos 4 y 5).

Sección 8-3 Propiedades en función del porcentaje de trabajo en frío

8-20 Escriba la ecuación que define el porcentaje de trabajo en frío. Explique el significado de cada término.

8-21 Se va a trabajar en frío al 63% una placa de cobre de 0.25 pulg de grosor. Encuentre el grosor final.

8-22 Se va a trabajar en frío al 63% en tensión una barra de cobre de 0.25 pulg de diámetro. Encuentre el diámetro final.

8-23 Una barra de cobre de 2 pulg de diámetro se reduce a 1.5 pulg de diámetro, después se reduce de nuevo a un diámetro final de 1 pulg. En un segundo caso, la barra de 2 pulg de diámetro se reduce en una etapa de un diámetro de 2 pulg a uno de 1 pulg. Calcule el % de TF para ambos casos.

- 8-24** Se reduce una placa de aluminio 3105 de 1.75 a 1.15 pulg. Determine las propiedades finales de la placa. Observe que 3105 indica una composición especial de aleación de aluminio. (Véase la figura 8-25.)

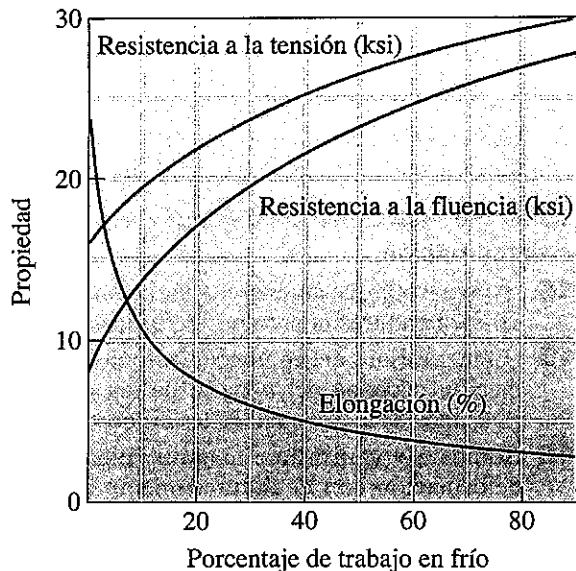


Figura 8-25 Efecto del porcentaje de trabajo en frío sobre las propiedades de una aleación de aluminio 3105 (para los problemas 8-24, 8-26 y 8-30).

- 8-25** Una barra de latón de Cu-30% Zn se reduce de un diámetro de 1 pulg a un diámetro de 0.45 pulg. Determine las propiedades finales de la barra. (Véase la figura 8-26.)

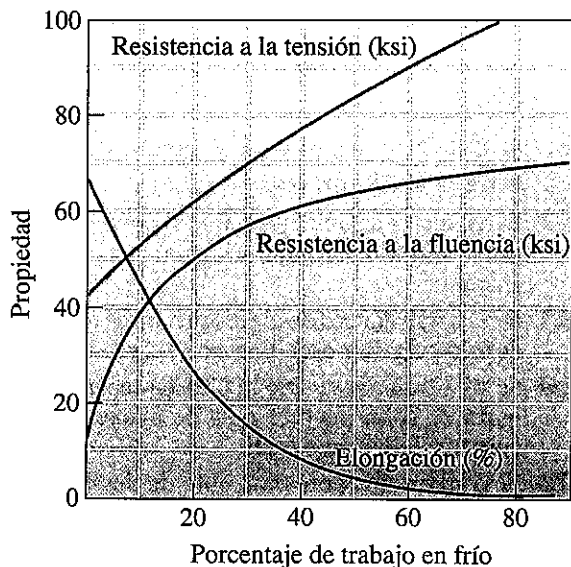


Figura 8-26 Efecto del porcentaje de trabajo en frío sobre las propiedades de un latón de Cu-30% Zn (para los problemas 8-25 y 8-28).

- 8-26** Una barra de aluminio 3105 se reduce de un diámetro de 1 pulg a un diámetro de 0.8 pulg, a un diámetro de 0.6 pulg y a un diámetro final de 0.4 pulg. Determine el % de TF y las propiedades después de cada etapa del proceso. Calcule el porcentaje total de trabajo en frío. Observe que 3105 indica una composición especial de aleación de aluminio. (Véase la figura 8-25.)

- 8-27** Se desea que una barra de cobre tenga una resistencia a la tensión de al menos 70 000 psi y un diámetro final de 0.375 pulg. ¿Cuál es el diámetro mínimo de la barra original? (Véase la figura 8-7.)

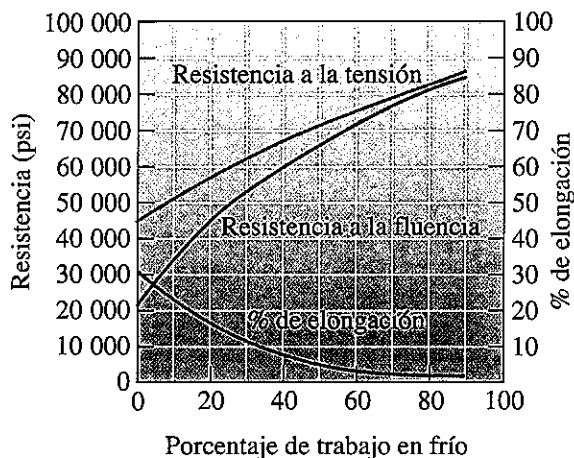


Figura 8-7 (Repetida para los problemas 8-27 y 8-29) Efecto del trabajo en frío sobre las propiedades mecánicas del cobre.

- 8-28** Se desea que una placa de latón de Cu-30% Zn originalmente de 1.2 pulg de grosor tenga una resistencia a la fluencia mayor a 50 000 psi y un % de elongación al menos del 10%, ¿Qué intervalo de grosores finales debe obtenerse? (Véase la figura 8-26.)

- 8-29** Se desea que una hoja de cobre tenga al menos una resistencia a la fluencia de 50 000 psi y una elongación al menos del 10%, con un grosor final de 0.12 pulg. ¿Qué intervalo del grosor original debe utilizarse? (Véase la figura 8-7.)

- 8-30** Una placa de aluminio 3105 trabajada en frío con anterioridad al 20% es de 2 pulg de grosor. Después se trabaja en frío hasta 1.3 pulg. Calcule el porcentaje total de trabajo en frío y determine las propiedades finales de la placa. (Nota: 3105 indica una composición especial de aleación de aluminio.) (Véase la figura 8-25.)

- 8-31** Se va a cortar una tira de aluminio y litio (Al-Li) de 0.2 de grosor y 2 pulg de ancho a partir de una hoja laminada, como se describe en la figura 8-10. La tira debe ser capaz de soportar una carga de 35 000 lb sin deformación

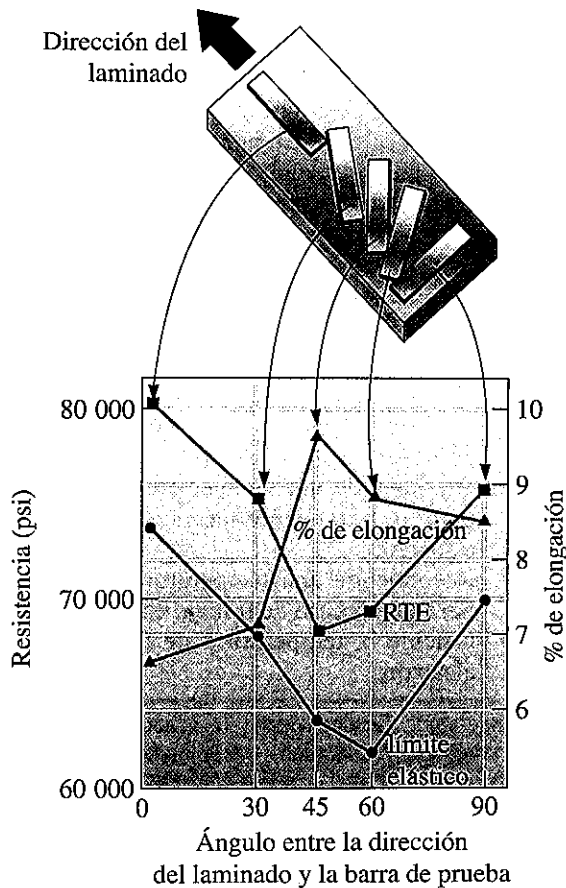


Figura 8-10 (Repetida para el problema 8-31) Comportamiento anisotrópico en una hoja laminada de un material de aluminio-litio utilizada en aplicaciones aeroespaciales. La representación relaciona la posición de las barras de tensión con las propiedades mecánicas que se obtienen.

plástica. Determine el intervalo de orientaciones a partir de las cuales debe cortarse la tira de la hoja laminada.

Sección 8-4 Microestructura, endurecimiento por textura y esfuerzos residuales

- 8-32** ¿La resistencia a la fluencia de los materiales metálicos depende de la textura cristalográfica desarrollada durante el trabajo en frío? Explique por qué.
- 8-33** ¿El módulo de Young de un material depende de las direcciones cristalográficas en un material cristalino? Explique por qué.
- 8-34** ¿A qué se refieren los términos "textura fibrosa" y "textura laminar"?
- 8-35** Una de las desventajas del proceso de laminado en frío es la generación de esfuerzos residuales. Explique cómo se pueden eliminar los esfuerzos residuales en los materiales metálicos trabajados en frío.

- 8-36** ¿Qué es el granallado?
- 8-37** ¿Cuál es la diferencia entre el templeado y el recocido de vidrios?
- 8-38** ¿En qué difiere el vidrio laminado de seguridad del vidrio templeado? ¿Dónde se utiliza el vidrio laminado?
- 8-39** ¿Qué es el templeado térmico? ¿En qué difiere del templeado químico? Enuncie aplicaciones de los vidrios templeados.
- 8-40** Explique qué factores afectan la resistencia de la mayoría de los vidrios. Explique cómo la templeadura térmica ayuda a incrementar la resistencia de los vidrios.
- 8-41** Los esfuerzos residuales no siempre son deseables. ¿Falso o verdadero? Justifique su respuesta.

Sección 8-5 Características del trabajo en frío

- 8-42** El trabajo en frío no puede utilizarse como un mecanismo de endurecimiento para los materiales que van a sujetarse a temperaturas altas durante su uso. Explique por qué.
- 8-43** Las latas de aluminio fabricadas por medio del embutido profundo obtienen una resistencia considerable durante su fabricación. Explique por qué.
- 8-44** Los metales como el magnesio no pueden endurecerse de manera efectiva utilizando el trabajo en frío. Explique por qué.
- 8-45** Se desea trefilar un alambre de cobre de 0.3 pulg de diámetro que tenga una resistencia a la fluencia de 20 000 psi en un alambre de 0.25 pulg de diámetro.
- Encuentre la fuerza de trefilado, suponiendo que no hay fricción;
 - ¿El alambre trefilado se romperá durante el proceso? Demuestra por qué. (Véase la figura 8-7.)

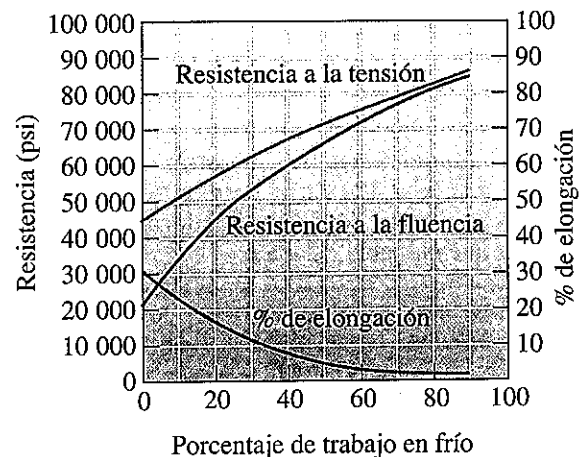


Figura 8-7 (Repetida para el problema 8-45) Efecto del trabajo en frío sobre las propiedades mecánicas del cobre.

8-46 Se va a trefilar un alambre de aluminio 3105 para obtener un alambre de 1 mm de diámetro que tenga una resistencia a la fluencia de 20 000 psi. Observe que 3105 indica una composición especial de aleación de aluminio.

- Encuentre el diámetro original del alambre;
- calcule la fuerza de trefilado requerida, y
- determine si el alambre trefilado se romperá durante el proceso. (Véase la figura 8-25.)

Sección 8-6 Las tres etapas del recocido

8-47 Explique las tres etapas del recocido de los materiales metálicos.

8-48 ¿Cuál es la fuerza motriz de la recrystalización?

8-49 En el estado de recuperación, los esfuerzos residuales se reducen; sin embargo, la resistencia del material metálico permanece sin cambiar. Explique por qué.

8-50 ¿Cuál es la fuerza motriz del crecimiento de granos?

8-51 Tratando el crecimiento de granos como la tercera etapa del recocido, explique su efecto sobre la resistencia de los materiales metálicos.

8-52 ¿Por qué el crecimiento de granos por lo regular es indeseable? Cite un ejemplo donde el crecimiento de granos sea en realidad útil.

8-53 ¿Cuáles son las diferentes maneras en las que se puede encontrar el crecimiento de granos en las cerámicas?

8-54 ¿El recocido y la recuperación son siempre prerequisites del crecimiento de granos? Explique por qué.

8-55 Una aleación de titanio contiene una dispersión muy fina de partículas de Er_2O_3 . ¿Cuál será el efecto de estas partículas sobre la temperatura del crecimiento de granos y el tamaño de granos a cualquier temperatura de recocido en particular? Explique por qué.

8-56 Explique por qué el filamento de tungsteno utilizado en una bombilla eléctrica incandescente acaba fallando.

8-57 Se laminaron en frío muestras de latón en carrete (Cu-30% Zn) y después se recocieron por una hora. Se obtuvo la información mostrada en la tabla de abajo.

Temperatura de recocido (°C)	Tamaño del grano (μm)	Resistencia a la fluencia (MPa)
400	15	159
500	23	138
600	53	124
700	140	62
800	505	48

a) Grafique la resistencia a la fluencia y el tamaño de los granos como una función de la temperatura de recocido en la misma gráfica. Utilice dos ejes verticales, uno para la resistencia a la fluencia y el otro para el tamaño de los granos.

b) Para cada temperatura, enuncie cuáles etapas del proceso de recocido ocurrieron. Justifique sus respuestas refiriéndose a las características de la gráfica.

8-58 La siguiente información se obtuvo cuando se recoció un metal trabajado en frío.

- Calcule las temperaturas de recuperación, de recrystalización y de crecimiento de granos;
- Recomiende una temperatura adecuada para un tratamiento térmico de alivio de esfuerzo;
- Recomiende una temperatura adecuada para un proceso de trabajo en caliente, y
- Calcule la temperatura de fusión de la aleación.

Temperatura de recocido (°C)	Conductividad eléctrica ($\text{ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Tamaño del grano (mm)
400	3.04×10^5	86	0.10
500	3.05×10^5	85	0.10
600	3.36×10^5	84	0.10
700	3.45×10^5	83	0.098
800	3.46×10^5	52	0.030
900	3.46×10^5	47	0.031
1000	3.47×10^5	44	0.070
1100	3.47×10^5	42	0.120

8-59 La siguiente información se obtuvo cuando se recoció un metal trabajado en frío:

- Calcule las temperaturas de recuperación, de recrystalización y de crecimiento de granos;
- Recomiende una temperatura adecuada para obtener un alambre con una resistencia alta y una conductividad eléctrica alta;
- Recomiende una temperatura adecuada para un proceso de trabajo en caliente, y
- Calcule la temperatura de fusión de la aleación.

Temperatura de templado (°C)	Esfuerzos residuales (MPa)	Resistencia a la tensión (Mpa)	Tamaño del grano (mm)
250	21 000	52 000	0.0030
275	21 000	52 000	0.0030
300	5 000	52 000	0.0030
325	0	52 000	0.0030
350	0	34 000	0.0010
375	0	30 000	0.0010
400	0	27 000	0.0035
425	0	25 000	0.0072

- 8-60** ¿A qué se refiere el término “recristalización”? Explique por qué la resistencia a la fluencia de un material metálico disminuye durante esta etapa del recocido.

Sección 8-7 Control del recocido

- 8-61** ¿En qué se distinguen el trabajo en caliente del trabajo en frío de los materiales metálicos?
- 8-62** ¿Por qué la temperatura de recristalización no es una temperatura fija para un material dado?
- 8-63** ¿Por qué el incremento del tiempo de un tratamiento térmico significa que la recristalización ocurrirá a una temperatura más baja?
- 8-64** Dos hojas de acero se trabajaron en frío al 20 y 80%, respectivamente. ¿Cuál de ellas es más probable que tenga una temperatura de recristalización más baja? ¿Por qué?
- 8-65** Dé ejemplos de dos materiales metálicos para los cuales la deformación a temperatura ambiente significará “trabajo en caliente”.
- 8-66** Dé ejemplos de dos materiales metálicos para los cuales la deformación mecánica a 900 °C significará “trabajo en frío”.
- 8-67** Considere las curvas de esfuerzo-deformación a la tensión en la figura 8-21 etiquetadas 1 y 2 y responda las siguientes preguntas. Estos diagramas son típicos de metales. Considere cada inciso como una pregunta por separado que no tiene relación con los incisos anteriores a la pregunta.

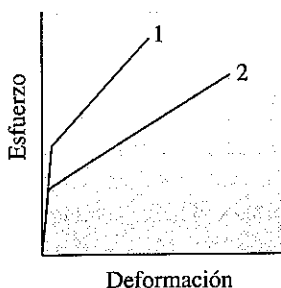


Figura 8-21
Curvas de
esfuerzo-
deformación
(para el
problema 8-67).

- a) ¿Cuál de los dos materiales representados por las muestras 1 y 2 puede laminarse en frío en mayor grado? ¿Cómo lo sabe?
- b) Las muestras 1 y 2 tienen la misma composición y se procesaron de manera idéntica, a excepción de que una de ellas

se trabajó en frío más que la otra. Las curvas de esfuerzo deformación se obtuvieron después que se trabajaron en frío las muestras. ¿Cuál muestra tiene la temperatura de recristalización más baja: 1 o 2? ¿Cómo lo sabe?

- c) Las muestras 1 y 2 son idénticas a excepción de que se recocieron a temperaturas distintas por el mismo periodo. ¿Cuál muestra se recoció a la temperatura más alta: 1 o 2? ¿Cómo lo sabe?
- d) Las muestras 1 y 2 son idénticas a excepción de que se recocieron a la misma temperatura por periodos distintos. ¿Cuál muestra se recoció por un periodo de tiempo menor: 1 o 2? ¿Cómo lo sabe?

Sección 8-8 Recocido y procesamiento de materiales

- 8-68** Utilizando la información en la tabla 8-4, grafique la temperatura de recristalización en función de la temperatura de fusión de cada metal, utilizando temperaturas absolutas (kelvin). Mida la pendiente y compárela con la relación esperada entre estas dos temperaturas. ¿Su aproximación es buena?

- 8-69** Se desea producir una placa de aluminio 3105 de 0.3 pulg de grosor que tenga una resistencia a la tensión de al menos 25 000 psi y un % de

TABLA 8-4 ■ Temperaturas de recristalización comunes para los metales seleccionados (Repetida para el problema 8-68)

Metal	Temperatura de fusión (°C)	Temperatura de recristalización (°C)
SN	232	-4
Pb	327	-4
Zn	420	10
Al	660	150
Mg	650	200
Ag	962	200
Cu	1085	200
Fe	1538	450
Ni	1453	600
Mo	2610	900
W	3410	1200

(Structure and Properties of Engineering Materials, cuarta edición por Brick, Pense, Gordon. Copyright 1977 Por McGraw-Hill Companies Inc.-Books. Reproducido con Permiso de McGraw-Hill Companies Inc.-Books en el formato de libro de texto por medio del Copyright Clearance Center).

elongación de al menos 5%. El grosor original de la placa es de 3 pulg. El trabajo en frío máximo en cada etapa es del 80%. Describa las etapas de trabajo en frío y de recocido requeridas para fabricar este producto. Compare este proceso con lo que recomendaría si pudiera realizar la deformación inicial por medio de trabajo en caliente. (Véase la figura 8-25.)

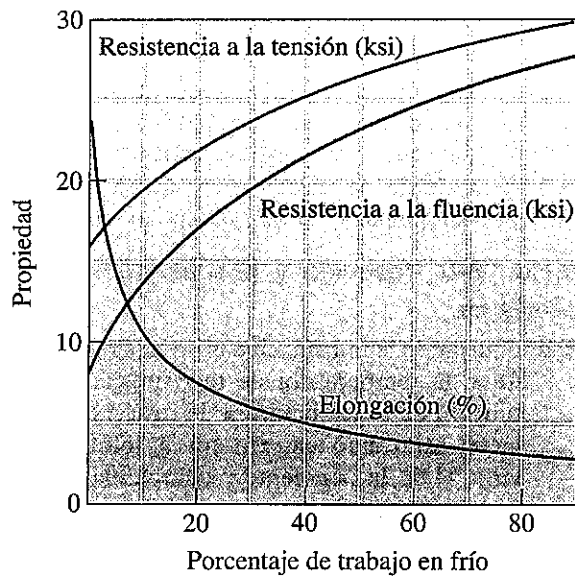


Figura 8-25 Efecto del porcentaje de trabajo en frío sobre las propiedades de una aleación de aluminio 3105 (para el problema 8-69).

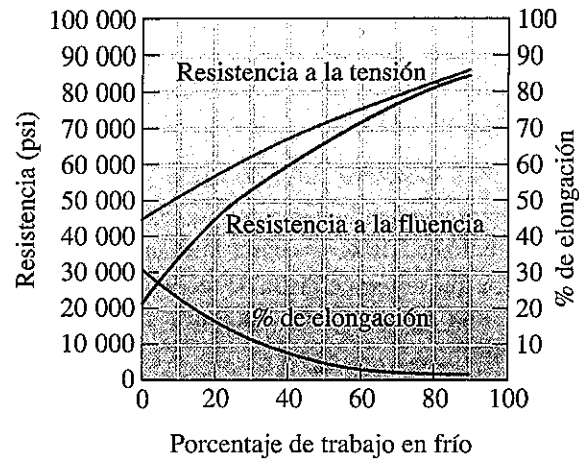


Figura 8-7 (Repetida para el problema 8-70) Efecto del trabajo en frío sobre las propiedades mecánicas del cobre.

Sección 8-9 Trabajo en caliente

8-73 La cantidad de deformación plástica que puede desarrollarse durante el trabajo en caliente es casi ilimitada. Justifique este enunciado.

8-74 Compare y contraste el trabajo en caliente y el trabajo en frío.



Problemas de diseño

8-70 Se desea producir un alambre de cobre de 0.2 pulg de diámetro que tenga una resistencia a la fluencia mínima de 60 000 psi y un porcentaje de elongación mínimo de 5%. El diámetro original de la barra es de 2 pulg y el trabajo en frío máximo en cada etapa es de 80%. Describa una secuencia de etapas de trabajo en frío y recocido para fabricar este producto. Compare este proceso con lo que recomendaría si pudiera realizar la deformación inicial por medio de trabajo en caliente. (Véase la figura 8-7.)

8-71 ¿Qué es una zona afectada por el calor? ¿Por qué algunos procesos de soldadura resultan en una unión donde el material en la zona afectada por el calor es más débil que el metal base?

8-72 ¿Qué técnicas de soldadura pueden utilizarse para evitar la pérdida de resistencia en el material en la zona afectada por el calor? Explique por qué estas técnicas son efectivas.

8-75 Diseñe, utilizando uno de los procesos explicados en este capítulo, un método para producir cada uno de los siguientes productos. ¿El proceso incluye trabajo en caliente, trabajo en frío, recocido o alguna combinación de estos? Explique sus decisiones.

- clips para papel;
- vigas en I que se soldarán para producir una porción de un puente;
- tubería de cobre que conectará una llave de agua al sistema de tuberías de cobre principal;
- la cinta de acero en una cinta métrica, y
- una cabeza para un martillo de carpintero formada a partir de una barra redonda.

8-76 Se planea unir dos hojas de cobre trabajado en frío por soldadura blanda. La soldadura involucra calentar el metal a una temperatura lo suficientemente alta para que se funda el material de aporte y se succione en la unión (capítulo 9). Diseñe un proceso de soldadura que no suavice al cobre. Explique. ¿Pudieran utilizarse tempe-

raturas de soldadura más altas si el material de la hoja fuera una aleación de Cu-30% Zn? Explique.

- 8-77** Se desea producir un alambre de cobre de 1 mm de diámetro que tenga una resistencia a la fluencia mínima de 60 000 psi y un porcentaje de elongación mínima de 5%. Se comienza con una barra de 20 mm de diámetro. Diseñe el proceso por medio del cual puede trefilarse el alambre. Incluya todos los detalles importantes y explique.

▲ Problemas de cómputo

- 8-78** *Razón de la deformación plástica.* Escriba un programa de cómputo que le pida al usuario que proporcione las dimensiones iniciales y finales (ancho y grosor) de una placa y provea el valor de la razón de la deformación plástica.
- 8-79** *Diseño de una proceso de trefilado de alambre.* Escriba un programa que compute de manera efectiva la solución al ejemplo resuelto 8-4. El programa debe pedirle al usuario que provea un valor del diámetro final para el alambre (por ejemplo, 0.20 cm). El programa debe suponer un valor razonable para el diámetro inicial (d_0) (por ejemplo, 0.40 cm) y calcular la extensión del trabajo en frío utilizando la fórmula apropiada. Suponga que el usuario tiene acceso a la curva de la resistencia a la fluencia en función del porcentaje de trabajo en frío y se le pide al usuario que introduzca el valor de la resistencia a la fluencia para el trabajo en frío al 0%. Utilice este valor para calcular las fuerzas necesarias para el trefilado y el esfuerzo que actúa sobre el alambre a medida que sale del dado. El programa debe pedirle al usuario que proporcione el valor de la resistencia a la fluencia del alambre para la cantidad de trabajo calculada para el diámetro inicial supuesto y el diámetro final necesario. Como en el ejemplo 8-4, el programa debe repetir este cálculo hasta que obtenga un valor de d_0 que sea aceptable.

K Knovel® Problemas

- K8-1** Un miembro de compresión cargado de manera axial se forma en frío a partir de una placa de acero 1025 AISI. En la figura K8-1 se muestra una sección transversal del miembro. El metal en las esquinas del miembro se fortaleció por trabajo en frío. Determine las resistencias última y a la fluencia del material antes de la formación; la resistencia a la fluencia del material en las esquinas de la sección después de la formación en frío; y la resistencia a la fluencia promedio de la sección, tomando en cuenta las porciones planas y las esquinas fortalecidas por el trabajo en frío. Suponga una sección compacta y un factor de reducción $\rho = 1.0$ (figura K8-1).

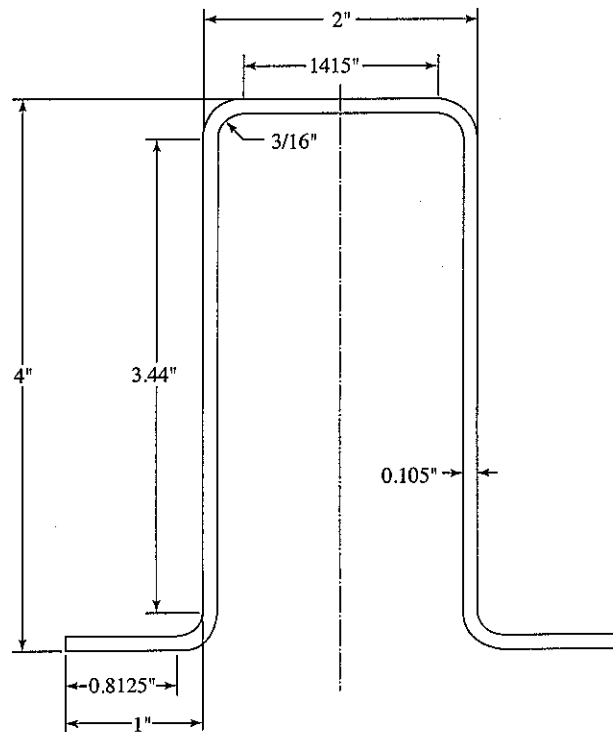


Figura K8-1 Una sección transversal del miembro de compresión para el problema K8-1.



© Davulcu | Dreamstime.com



© Viktor50 | Dreamstime.com



La fotografía a la izquierda muestra un proceso de fundición conocido como moldeo en arena verde. La arena aglomerada con arcilla se empaqueta alrededor de un patrón en un molde en dos partes. El patrón se elimina, dejando atrás una cavidad y el metal fundido se vierte en la cavidad. Los núcleos de arena pueden producir cavidades internas en la fundición. Después de que el metal se solidifica, se elimina la arena para obtener la pieza. La fotografía a la derecha muestra un proceso conocido como fundición por revestimiento. En la fundición por revestimiento o a la cera perdida, se prepara un patrón a partir de un material que se funde con facilidad como una cera. El patrón después se "recubre" con una lechada y se construye una estructura alrededor del patrón utilizando partículas. El patrón se elimina utilizando calor y se vierte el metal fundido en la cavidad. A diferencia de la fundición en arena, el patrón no es reutilizable. La fundición en arena y la fundición por revestimiento son sólo dos de una amplia variedad de procesos de fundición.

Principios de la solidificación

¿Se ha preguntado alguna vez?

- ¿Si el agua realmente se "congela" a 0 °C y "hierva" a 100 °C?
- ¿Cuál es el proceso utilizado para producir varios millones de libras de aceros y otras aleaciones?
- ¿Existe una temperatura de fusión específica para una aleación o un material termoplástico?
- ¿Qué factores determinan la resistencia de un producto vaciado?
- ¿Por qué la mayoría de los vidrios y vidrios-cerámicos se procesan por medio de fusión y vaciado?

De todas las técnicas de procesamiento empleadas en la fabricación de materiales, la solidificación es probablemente la más importante. Todos los materiales metálicos, al igual que varias cerámicas, vidrios inorgánicos y polímeros termoplásticos, son líquidos o están fundidos en algún punto durante el procesamiento. Al igual que el agua se congela a hielo, los materiales fundidos se solidifican a medida que se enfrían por debajo de su temperatura de solidificación. En el capítulo 3, se aprendió cómo se clasifican los materiales con base en su orden atómico, iónico o molecular. Durante la solidificación de materiales que se cristalizan, el arreglo atómico cambia de un orden de corto alcance (OCA) a un orden de largo alcance (OLA). La solidificación de materiales cristalinos requiere de dos etapas. En la primera, se forman cristalitos ultrafinos, conocidos como los núcleos de una fase sólida, a partir del líquido. En la segunda etapa, la cual puede traslaparse con la primera, los cristalitos sólidos ultrafinos comienzan a crecer a medida que los átomos del líquido se unen a los núcleos hasta que no queda líquido. Algunos materiales, como los vidrios inorgánicos de silicato, se volverán sólidos sin desarrollar un orden de largo alcance (es decir, permanecen amorfos). Muchos materiales poliméricos pueden desarrollar una cristalinidad parcial durante la solidificación o el procesamiento.

La solidificación de materiales metálicos, poliméricos y cerámicos es un proceso importante a estudiar debido a su efecto sobre las propiedades de los materiales involucrados. En este capítulo se estudiarán los principios de la solidificación como se aplican a los metales puros. En los capítulos siguientes se explicará la solidificación de aleaciones y materiales más complejos. Primero se explicará la importancia tecnológica de la solidificación y después se examinarán los mecanismos por medio de los cuales ocurre la solidificación. A esto le seguirá un examen de la microestructura

de los materiales metálicos vaciados y su efecto sobre las propiedades mecánicas del material. También se examinará la función del vaciado como un proceso de moldeo de materiales. Se examinarán cómo se emplean las técnicas como la soldadura, la soldadura fuerte y la soldadura blanda para unir materiales metálicos. También se explicarán las aplicaciones del proceso de solidificación en el crecimiento de monocristales y la solidificación de vidrios y polímeros.

9-1 Importancia tecnológica

La habilidad para utilizar el calor para producir, derretir y colar metales como cobre, bronce y acero se considera una característica importante en el desarrollo de la humanidad. El uso del fuego para convertir minerales de procedencia natural en metales y aleaciones condujo a la producción de herramientas útiles y otros productos. En la actualidad, miles de años después, la **solidificación** se sigue considerando uno de los procesos de fabricación más importantes. Se producen varios millones de libras de acero, aleaciones de aluminio, cobre y zinc a través del proceso de vaciado. El proceso de solidificación también se emplea para fabricar componentes específicos (por ejemplo, la aleación de aluminio para rines de automóviles). La industria también utiliza el proceso de solidificación como una etapa de **procesamiento primario** para producir bloques o lingotes (un vaciado sencillo y con frecuencia grande que se procesa posteriormente en formas útiles). Los lingotes o bloques se trabajan en caliente y en frío a través de etapas de **procesamiento secundario** en formas más útiles (es decir, hojas, alambres, barras, placas, etc.). La solidificación también se aplica cuando se unen materiales metálicos utilizando técnicas como la soldadura, la soldadura fuerte y la soldadura blanda.

También se utiliza la solidificación para el procesamiento de vidrios inorgánicos: por ejemplo, el vidrio de silicato se procesa utilizando el proceso de vidrio flotado. Las fibras ópticas de alta calidad y otros materiales, como las fibras de vidrio, también se producen a partir de la solidificación de vidrios fundidos. Durante la solidificación de los vidrios inorgánicos, se producen materiales amorfos en vez de cristalinos. En la fabricación de vidrios-cerámicos, primero se moldean los materiales por medio del vaciado de los vidrios amorfos, y después se cristalizan utilizando un tratamiento térmico para aumentar su resistencia. Muchos materiales termoplásticos como el polietileno, el cloruro de polivinilo (PVC), el polipropileno y similares se procesan en formas útiles (es decir, fibras, tubos, botellas, juguetes, utensilios, etc.) empleando un proceso que involucra fundición y solidificación. Por tanto, la solidificación es una tecnología importante en extremo utilizada para controlar las propiedades de muchos productos derivados de la fundición al igual que una herramienta para la fabricación de materiales de ingeniería modernos. En la siguiente sección, primero se explican los procesos de formación de núcleos (nucleación) y crecimiento.

9-2 Formación de núcleos

En el contexto de la solidificación, el término **formación de núcleos (nucleación)** se refiere a la formación de los primeros nanocristalitos del material fundido. Por ejemplo, a medida que el agua comienza a congelarse, se forman nanocristalitos, conocidos como **núcleos**. En un sentido amplio, el término formación de núcleos se refiere a la etapa de formación inicial de una fase a partir de otra fase. Cuando el vapor se condensa en líquido, a las gotas de tamaño a nanoescala del líquido que aparecen cuando comienza la condensación se les refiere como núcleos. Más adelante, también se verá que existen varios sistemas en los que los núcleos de un sólido (α) se formarán a partir un segundo material sólido (β) (es decir, la transformación de fase α a β). Lo interesante acerca de estas transformaciones es que, en la mayoría de los materiales

de ingeniería, varias de ellas ocurren mientras el material está en el estado sólido (es decir, no hay fusión involucrada). Por tanto, aunque se explica la formación de núcleos desde la perspectiva de la solidificación, es importante observar que el fenómeno de la formación de núcleos es general y está asociado con las transformaciones de fase.

Se espera que un material se solidifique cuando el líquido se enfría justo por debajo de su temperatura de solidificación (o fusión), debido a que la energía asociada con la estructura cristalina del sólido es entonces menor que la energía del líquido. Esta diferencia en energía entre el líquido y el sólido es la energía libre por unidad de volumen ΔG_v y es la fuerza motriz para la solidificación.

Sin embargo, cuando el sólido se forma se crea una interfaz sólido-líquido (figura 9-1a)). Una energía de superficie libre σ_{sl} está asociada con esta interfaz. Por tanto, el cambio total en energía ΔG , mostrado en la figura 9-1b) es

$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \sigma_{sl} \quad (9-1)$$

donde $\frac{4}{3}\pi r^3$ es el volumen de un sólido esférico de radio r , $4\pi r^2$ es el área de superficie de un sólido esférico, σ_{sl} es la energía libre de superficie de la interfaz sólido-líquido (en este caso) y ΔG_v es el cambio en energía libre por unidad de volumen, el cual es negativo dado que la transformación de fase se supone factible de manera termodinámica. Observe que σ_{sl} no es una función dependiente de r y se supone constante. Tiene unidades de energía por unidad de área. ΔG_v tampoco depende de r .

Un embrión es una partícula pequeña de sólido que se forma a partir del líquido a medida que los átomos se aglomeran entre sí. El embrión es inestable y puede crecer en un núcleo estable o volverse a disolver.

En la figura 9-1b), la curva superior muestra la variación parabólica de la energía total de superficie ($4\pi r^2 \cdot \sigma_{sl}$). La curva inferior muestra el término del cambio de energía libre por volumen total ($\frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \Delta G_v$). La curva en medio muestra la variación de ΔG . Representa la

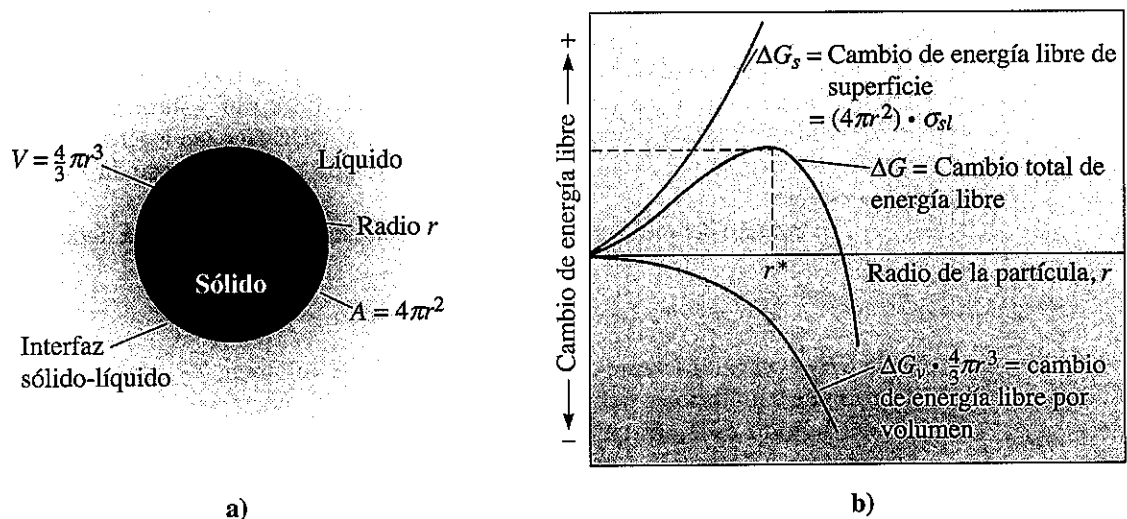


Figura 9-1 a) Se crea una interfaz cuando se forma un sólido a partir del líquido. b) La energía libre total del sistema sólido-líquido cambia con el tamaño del sólido. El sólido es un embrión si su radio es menor al radio crítico y es un núcleo si su radio es mayor al radio crítico.

suma de las otras dos curvas dadas por la ecuación 9-1. A la temperatura a la que se predice que las fases sólida y líquida estarán en equilibrio termodinámico (es decir, a la temperatura de solidificación), la energía libre de la fase sólida y la de la fase líquida son iguales ($\Delta G_v = 0$), por lo que el cambio total de energía libre (ΔG) será positivo. Cuando el sólido es muy pequeño, con un radio menor al **radio crítico** para la formación de núcleos (r^*) (figura 9-1b)), un **crecimiento** posterior ocasiona que aumente la energía libre total. El radio crítico (r^*) es el tamaño mínimo de un cristal que debe formarse por medio del aglomerado de átomos en el líquido antes de que la partícula sólida sea estable y comience a crecer.

La formación de embriones es un proceso estadístico. Se forman y se vuelven a disolver muchos embriones. Si por casualidad, se forma un embrión que tenga un radio que sea mayor que r^* , un crecimiento posterior ocasiona que la energía libre total disminuya. El nuevo sólido es entonces estable y sostenible dado que ha ocurrido la formación de núcleos y comienza el crecimiento de la partícula sólida —a la cual se le llama ahora núcleo—. A las temperaturas termodinámicas de fusión o solidificación, la probabilidad de formación de núcleos estables y sostenibles es extremadamente pequeña. Por tanto, la solidificación no comienza a la temperatura termodinámica de fusión o solidificación. Si la temperatura continúa disminuyendo por debajo de la temperatura de solidificación de equilibrio, la fase líquida que debe haberse transformado en un sólido se vuelve cada vez más inestable de manera termodinámica. Debido a que el líquido está por debajo de la temperatura de solidificación de equilibrio, el líquido se considera subenfriado. El **subenfriamiento** (ΔT) es la diferencia entre la temperatura de solidificación de equilibrio y la temperatura real del líquido. A medida que la extensión del subenfriamiento aumenta, la fuerza motriz termodinámica para la formación de una fase sólida a partir del líquido supera la resistencia a crear una interfaz sólido-líquido.

Este fenómeno puede observarse en muchas otras transformaciones de fase. Cuando una fase sólida (α) se transforma en otra fase sólida (β), el sistema tiene que enfriarse a una temperatura que esté por debajo de la temperatura termodinámica de transformación de fase (a la que las energías de las fases α y β son iguales). Cuando un líquido se transforma en un vapor (es decir, el agua hierve), se crea una burbuja de vapor en el líquido. Sin embargo, para crear la transformación, ¡se necesita **sobrecalentar** el líquido por encima de su temperatura de ebullición! Por tanto, ¡se puede ver que los líquidos realmente no se congelan a su temperatura de congelación y que no hierven a su punto de ebullición! ¡Se necesita subenfriar el líquido para que se solidifique y sobrecalentarlo para que hierva!

Nucleación homogénea A medida que un líquido se enfría a temperaturas por debajo de la temperatura de solidificación de equilibrio, se combinan dos factores para favorecer la formación de núcleos. Primero, dado que los átomos están perdiendo su energía térmica, la probabilidad de que se formen aglomerados para formar embriones más grandes aumenta. Segundo, la mayor diferencia de energía libre por volumen entre el líquido y el sólido reduce el tamaño crítico (r^*) del núcleo. La **nucleación homogénea** ocurre cuando el subenfriamiento se vuelve lo suficientemente grande para ocasionar la formación de un núcleo estable.

El tamaño del radio crítico r^* para la nucleación homogénea está dado por

$$r^* = \frac{2\sigma_{sl}T_m}{\Delta H_f\Delta T} \quad (9-2)$$

donde ΔH_f es el calor latente de fusión por unidad de volumen, T_f es la temperatura de solidificación de equilibrio en kelvins y $\Delta T = (T_f - T)$ es el subenfriamiento cuando la temperatura del líquido es T . El calor latente de fusión representa el calor perdido durante la transformación de líquido a sólido. A medida que el subenfriamiento aumenta, el radio crítico requerido para la formación de núcleos disminuye. La tabla 9-1 presenta los valores para σ_{sl} , ΔH_f y los subenfriamientos comunes observados de manera experimental para la nucleación homogénea.

El siguiente ejemplo muestra cómo se puede calcular el radio crítico del núcleo para la solidificación del cobre.

TABLA 9-1 ■ Valores para la temperatura de solidificación, el calor latente de fusión, la energía de superficie y el subenfriamiento máximo para los materiales seleccionados

Material	Temperatura de solidificación (T_f) (°C)	Calor de fusión (ΔH_f) (J/cm ³)	Energía interfacial sólido-líquido (σ_{sl}) (J/cm ²)	Subenfriamiento común para la nucleación homogénea (ΔT) (°C)
Ga	30	488	56×10^{-7}	76
Bi	271	543	54×10^{-7}	90
Pb	327	237	33×10^{-7}	80
Ag	962	965	126×10^{-7}	250
Cu	1085	1628	177×10^{-7}	236
Ni	1453	2756	255×10^{-7}	480
Fe	1538	1737	204×10^{-7}	420
NaCl	801			169
CsCl	645			152
H ₂ O	0			40

Ejemplo 9-1

Calcule el tamaño del radio crítico y el número de átomos en el núcleo crítico cuando se forma cobre sólido por medio de nucleación homogénea. Comente sobre el tamaño del núcleo y las suposiciones que realizó mientras dedujo la ecuación para el radio del núcleo.

SOLUCIÓN

A partir de la tabla 9-1 para el Cu:

$$\Delta T = 236^\circ\text{C} \quad T_m = 1085 + 273 = 1358 \text{ K}$$

$$\Delta H_f = 1628 \text{ J/cm}^3$$

$$\sigma_{sl} = 177 \times 10^{-7} \text{ J/cm}^2$$

Por tanto r^* está dado por

$$r^* = \frac{2\sigma_{sl}T_f}{\Delta H_f\Delta T} = \frac{(2)(177 \times 10^{-7})(1358)}{(1628)(236)} = 12.51 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

Observe que la diferencia en temperatura de 1°C es igual a un cambio de temperatura de 1 K, o $\Delta T = 236^\circ\text{C} = 236 \text{ K}$.

El parámetro de red para el cobre CCCa es $a_0 = 0.3615 \text{ nm} = 3.615 \times 10^{-8} \text{ cm}$. Por tanto, el volumen de la celda unitaria está dado por

$$V_{\text{celda unitaria}} = (a_0)^3 = (3.615 \times 10^{-8})^3 = 47.24 \times 10^{-24} \text{ cm}^3$$

El volumen del radio crítico está dado por

$$V_{r^*} = \frac{4}{3}\pi r^3 = \left(\frac{4}{3}\pi\right)(12.51 \times 10^{-8})^3 = 8200 \times 10^{-24} \text{ cm}^3$$

El número de celdas unitarias en el núcleo crítico es

$$\frac{V_{\text{celda unitaria}}}{V_{r^*}} = \frac{8200 \times 10^{-24}}{47.24 \times 10^{-24}} = 174 \text{ celdas unitarias}$$

Dado que hay cuatro átomos en cada celda unitaria CCCa, el número de átomos en el núcleo crítico debe ser

$$(4 \text{ átomos/celda})(174 \text{ celdas/núcleo}) = 696 \text{ átomos/núcleo}$$

En estos tipos de cálculos se supone que un núcleo que está conformado a partir de sólo unos cuantos cientos de átomos seguirá exhibiendo propiedades similares a las de los materiales voluminosos. Esto no es estrictamente correcto y como tal se considera una debilidad de la teoría clásica de la nucleación.

Nucleación heterogénea A partir de la tabla 9-1, ¿puede verse que el agua no se solidificará en hielo a través de la nucleación homogénea hasta que se alcance una temperatura de -40°C (subenfriamiento de 40°C)! A excepción de experimentos controlados en el laboratorio, la nucleación homogénea nunca ocurre en los líquidos. En vez de esto, las impurezas en contacto con el líquido, ya sea suspendidas en el líquido o en las paredes del contenedor que guarda el líquido, proveen una superficie en la que puede formarse el sólido (figura 9-2). Ahora, se logra un radio de curvatura mayor al radio crítico con muy poca superficie total entre el sólido y el líquido. Relativamente unos cuantos átomos deben aglomerarse para producir una partícula sólida que tiene el radio de curvatura requerido. Se requiere mucho menos subenfriamiento para alcanzar el tamaño crítico, por lo que la nucleación ocurre de manera más rápida. A la nucleación en las superficies preexistentes se le conoce como **nucleación heterogénea**. Este proceso es dependiente del ángulo de contacto (θ) para la fase de nucleación y la superficie en la que ocurre ésta. El mismo tipo de fenómeno ocurre en las transformaciones de estado sólido.

Rapidez de nucleación La *rapidez de nucleación* (el número de núcleos formados por unidad de tiempo) es una función de la temperatura. Por supuesto, antes de la solidificación no hay nucleación y, a temperaturas por encima del punto de congelación, la rapidez de nucleación es cero. A medida que la temperatura disminuye, la fuerza motriz para la nucleación aumenta; sin embargo, a medida que la temperatura disminuye, la difusión atómica se vuelve más lenta, por tanto ralentiza el proceso de nucleación. Por tanto, una rapidez de nucleación común alcanza un máximo a alguna temperatura por debajo de la temperatura de transformación. En la nucleación

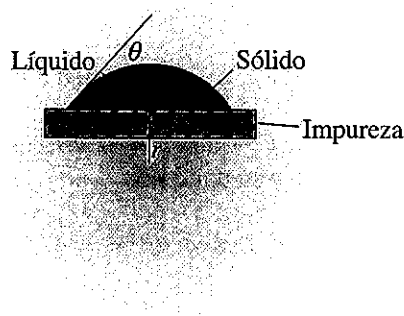


Figura 9-2

Un sólido que se forma sobre una impureza puede asumir el radio crítico con un aumento menor en la energía de superficie. Por tanto, la nucleación heterogénea puede ocurrir con subenfriamientos relativamente bajos.

heterogénea, su rapidez está determinada por la concentración de los agentes de nucleación. Al considerar las rapidezces de nucleación y crecimiento, se puede predecir la rapidez total de una transformación de fase.

9-3 Aplicaciones de la nucleación controlada

Endurecimiento por tamaño del grano Cuando un metal vaciado se solidifica, las impurezas en la fundición y las paredes del molde en el que ocurre la solidificación sirven como sitios de nucleación heterogénea. En algunas ocasiones se introducen de manera intencional partículas de nucleación en el líquido. A tales prácticas se les llama **refinamiento de granos** o **inoculación**. A las sustancias químicas adicionadas a los metales fundidos para promover la nucleación y, por tanto, un tamaño de grano más fino, se les conoce como **refinadores de granos** o **inoculadores**. Por ejemplo, se adiciona una combinación de 0.03% titanio (Ti) y 0.01% boro (B) a muchas aleaciones líquidas de aluminio. Se forman pequeñas partículas de un compuesto de aluminio y titanio (Al_3Ti) o de diboruro de titanio (TiB_2) y sirven como sitios para la nucleación heterogénea. El refinamiento de granos o inoculación produce un gran número de granos, cada uno comienza a crecer a partir de un núcleo. El área mayor de límites de los granos provee un endurecimiento por tamaño del grano en los materiales metálicos. En el capítulo 4 se explicó esto utilizando la ecuación de Hall-Petch.

Endurecimiento de segunda fase En los capítulos 4 y 5, se aprendió que en los materiales metálicos, el movimiento de las dislocaciones puede ser resistido por los límites de los granos o por la formación de precipitados ultrafinos de una segunda fase. Al endurecimiento de materiales utilizando precipitados ultrafinos se le conoce como **endurecimiento por dispersión** o **endurecimiento de segunda fase**; se utiliza de manera extensiva en la mejora de las propiedades mecánicas de muchas aleaciones. Este proceso involucra **transformaciones de fase de estado sólido** (es decir, un sólido se transforma en otro). Los límites de los granos al igual que los defectos a nivel atómico dentro de los granos de la fase precursora (α) con frecuencia sirven como sitios de nucleación para la nucleación heterogénea de la nueva fase (β). Este fenómeno de nucleación desempeña una función crítica en los mecanismos de endurecimiento. Esto se explicará en los capítulos 10 y 11.

Vidrios Para rapidezces de enfriamiento rápidas y/o fundiciones de viscosidad alta, puede haber insuficiente tiempo para que se formen y crezcan núcleos. Cuando esto sucede, la estructura líquida se coloca en su sitio y se forma un sólido amorfo —o vítreo—. La estructura cristalina compleja de muchos materiales cerámicos y poliméricos previene la formación de núcleos de una estructura cristalina sólida aun a rapidezces de enfriamiento lentas. Algunas aleaciones con composiciones especiales poseen estructuras cristalinas lo suficientemente complejas, por lo que pueden formar materiales amorfos si se enfrían con rapidez a partir de la fundición. A estos materiales se les conoce como vidrios metálicos. Por lo regular, los buenos formadores de vidrios metálicos son aleaciones multicomponente, con frecuencia con grandes diferencias en los tamaños atómicos de los constituyentes elementales. Esta complejidad limita las solubilidades sólidas de los elementos en las fases cristalinas, por tanto se requiere de fluctuaciones químicas grandes para formar los núcleos cristalinos de tamaño crítico. Los vidrios metálicos se producían inicialmente por medio del **procesamiento de solidificación rápida** en el que se alcanzaban rapidezces de enfriamiento de $10^6\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ por medio de la formación de cintas delgadas metálicas continuas de alrededor de 0.0015 pulg de grosor. (El calor puede extraerse de manera rápida de las cintas con una razón grande de área de superficie a volumen.)

En la actualidad se producen vidrios metálicos voluminosos con diámetros mayores a 1 pulg utilizando una variedad de técnicas de procesamiento para composiciones que requieren

rapideces de enfriamiento en el orden de sólo decenas de grados por segundo. Se han descubierto muchas composiciones de vidrios metálicos voluminosos, incluyendo el $\text{Pd}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{20}$ y el $\text{Zr}_{41.2}\text{Ti}_{13.8}\text{Cu}_{12.5}\text{Ni}_{10.0}\text{Be}_{22.5}$. Muchos vidrios metálicos tienen resistencias en exceso de 250 000 psi mientras retienen tenacidades a la fractura de más de 10 000 psi $\sqrt{\text{pulg}}$. La resistencia a la corrosión, propiedades magnéticas y otras propiedades físicas excelentes hacen que estos materiales sean atractivos para una amplia variedad de aplicaciones.

Otros ejemplos de materiales que usan la formación de núcleos controlada son los vidrios de color y el **vidrio fotocrómico** (vidrio que cambia de color o de tinte al exponerse a la luz del sol). En estos materiales que de otra manera serían amorfos, se nuclean de manera deliberada nanocristalitos de diferentes materiales. Los cristales son pequeños y, por tanto, no vuelven opaco al vidrio. Tienen propiedades ópticas especiales que hacen al vidrio de color brillante o fotocrómico.

Muchos materiales formados a partir de una fase de vapor pueden enfriarse con rapidez por lo que no se cristalizan y por tanto, son amorfos (es decir, el silicio amorfo), lo que ilustra que los materiales amorfos o no cristalinos *no* siempre se forman a partir de fundiciones.

Vidrios-cerámicos El término **vidrio-cerámico** se refiere a los materiales de ingeniería que comienzan como vidrios amorfos y terminan como cerámicas cristalinas con un tamaño de grano ultrafino. Estos materiales son casi libres de porosidad, mecánicamente más resistentes y con frecuencia mucho más resistentes al impacto térmico. La formación de núcleos no ocurre con facilidad en los vidrios de silicato; sin embargo, se puede ayudar introduciendo agentes de formación de núcleos como la titania (TiO_2) y la zirconia (ZrO_2). Los vidrios-cerámicos ingenieriles aprovechan la facilidad con la que los vidrios pueden fundirse y formarse. Una vez formado el vidrio, se puede calentar para formar de manera deliberada cristales ultrafinos, obteniendo un material que tiene una tenacidad mecánica y una resistencia al impacto térmico considerables. La cristalización de los vidrios-cerámicos continúa hasta que todo el material se cristaliza (puede obtenerse hasta un 99.9% de cristalinidad). Si el tamaño de los granos se mantiene pequeño ($\sim 50\text{-}100\text{ nm}$), los vidrios-cerámicos con frecuencia pueden ser transparentes. Con el tiempo todos los vidrios se cristalizarán como resultado de la exposición a temperaturas altas por periodos largos. Sin embargo, para producir un vidrio-cerámico la cristalización debe controlarse de manera cuidadosa.

9-4 Mecanismos de crecimiento

Una vez que se forman los núcleos sólidos de una fase (en un líquido u otra fase sólida), comienza a ocurrir el crecimiento a medida que se unen más átomos a la superficie sólida. Esta explicación se concentrará en la formación de núcleos y el crecimiento de cristales a partir del líquido. La naturaleza del crecimiento de los núcleos sólidos depende de cómo se eliminó el calor del material fundido. Por ejemplo, se considera el vaciado de un metal fundido en un molde. Se supone que se tiene un metal casi puro y no una aleación (ya que la solidificación de las aleaciones es diferente en que en la mayoría de los casos, ocurre sobre un intervalo de temperaturas). En el proceso de solidificación, deben eliminarse dos tipos de calores: el calor específico del líquido y el calor latente de fusión. El **calor específico** es el calor requerido para cambiar la temperatura de una unidad de peso del material en un grado. El calor específico debe eliminarse primero, ya sea por radiación a la atmósfera circundante o por la conducción en el molde que lo rodea, hasta que el líquido se enfría a su temperatura de solidificación. Esto es simplemente un enfriamiento del líquido de una temperatura a una temperatura a la que comienza la formación de núcleos.

Se sabe que para fundir un sólido se necesita suministrar calor. Por tanto, cuando se forman cristales sólidos a partir de un líquido, ¡se genera calor! Este tipo de calor es el **calor latente de fusión** (ΔH_f). El calor latente de fusión debe eliminarse de la interfaz sólido-líquido antes de que se complete la solidificación. La manera en la que se elimina el calor latente de fusión determina el mecanismo de crecimiento del material y la estructura final de una pieza colada.

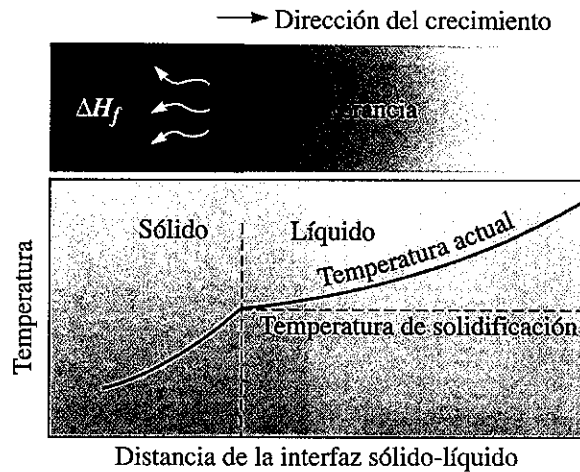


Figura 9-3

Cuando la temperatura del líquido está por encima de la temperatura de solidificación, no crecerá una protuberancia sobre la interfaz sólido-líquido, lo que conduce al mantenimiento de una interfaz plana. El calor latente se elimina de la interfaz a través del sólido.

Crecimiento planar Cuando se enfría un líquido bien inoculado (es decir, un líquido que contiene agentes de formación de núcleos) en condiciones de equilibrio, no hay necesidad de subenfriarlo dado que puede ocurrir la nucleación heterogénea. Por tanto, la temperatura del líquido más allá del **frente de solidificación** (es decir, la interfaz sólido-líquido) es mayor que la temperatura de solidificación. La temperatura del sólido está a o por debajo de la temperatura de solidificación. Durante la solidificación, el calor latente de fusión se elimina por conducción de la interfaz sólido-líquido. Cualquier protuberancia pequeña que comienza a crecer en la interfaz está rodeada por líquido por encima de la temperatura de solidificación (figura 9-3). El crecimiento de la protuberancia se detiene hasta que el resto de la interfaz la alcanza. Este mecanismo de crecimiento, conocido como **crecimiento planar**, ocurre por el movimiento de una interfaz sólido-líquido lisa o plana hacia el líquido.

Crecimiento dendrítico Cuando el líquido no está inoculado y la formación de núcleos es mala, el líquido tiene que subenfriarse antes de que se forme el sólido (figura 9-4). En estas condiciones, se promueve que crezca una protuberancia sólida pequeña llamada **dendrita**, la cual se forma en la interfaz, dado que el líquido más allá del frente de solidificación está subenfriado, es inducido a crecer. La palabra dendrita proviene de la palabra griega *dendron* que significa árbol. A medida que la dendrita sólida crece, el calor latente de fusión es conducido en el líquido subenfriado, elevando la temperatura del líquido hacia la temperatura de solidificación. También pueden formarse brazos dendríticos secundarios y terciarios sobre los tallos primarios para acelerar la evolución del calor latente. El crecimiento dendrítico continúa hasta que se calienta el líquido subenfriado a la temperatura de solidificación. Cualquier líquido restante se solidifica por medio del crecimiento planar. La diferencia entre el crecimiento planar y el dendrítico surge debido a las distintas disipaciones para el calor latente de fusión. El contenedor o molde debe absorber el calor en el crecimiento planar, pero el líquido subenfriado absorbe el calor en el crecimiento dendrítico.

En los metales puros el crecimiento dendrítico por lo general sólo representa una fracción pequeña del crecimiento total y está dado por

$$\text{Fracción dendrítica} = f = \frac{c\Delta T}{\Delta H_f} \quad (9-3)$$

donde c es el calor específico del líquido. El numerador representa el calor que puede absorber el líquido subenfriado y el calor latente en el denominador representa el calor total que debe eliminarse durante la solidificación. A medida que la ΔT del subenfriamiento aumenta, ocurre

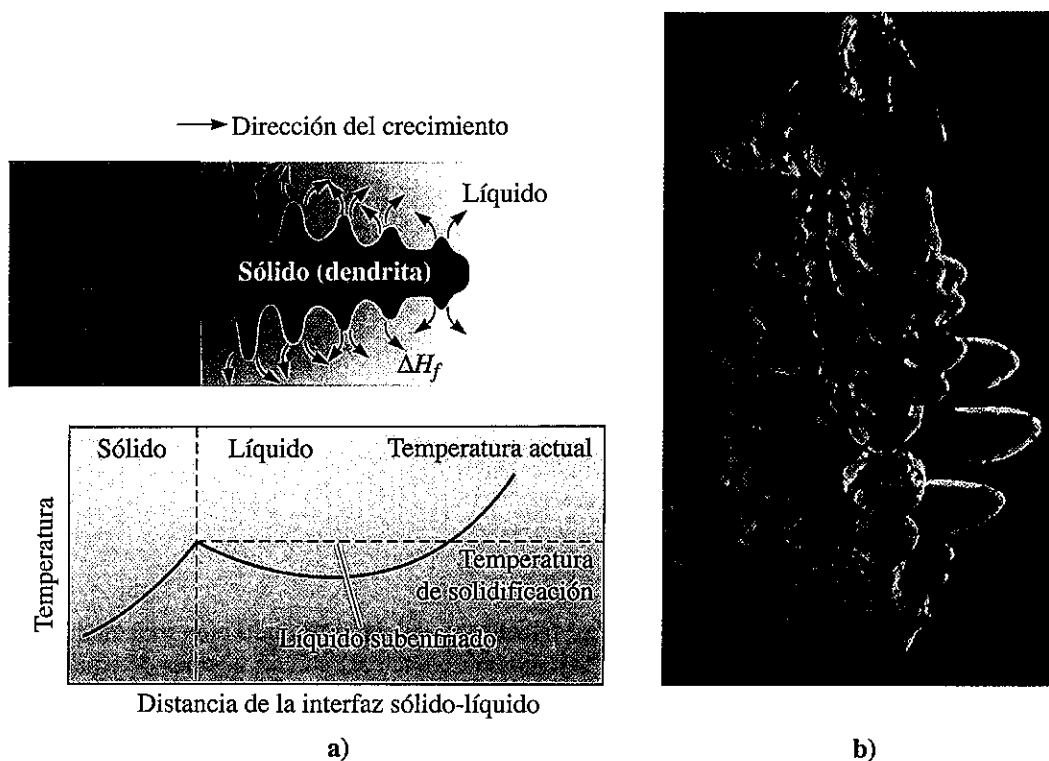


Figura 9-4 a) Si se subenfriá el líquido, una protuberancia sobre la interfaz sólido-líquido puede crecer más rápido como una dendrita. El calor latente de fusión se elimina elevando la temperatura del líquido a la temperatura de solidificación. b) Micrografía electrónica de barrido de las dendritas en el acero (15×). (Reimpresión cortesía de Don Askeland.)

más crecimiento dendrítico. Si el líquido está bien inoculado, el subenfriamiento es casi cero y el crecimiento sería principalmente por medio del mecanismo de solidificación del frente plano.

9-5 Tiempo de solidificación y tamaño dendrítico

La rapidez a la que ocurre el crecimiento del sólido depende de la rapidez de enfriamiento, o la rapidez de extracción del calor. Una rapidez de enfriamiento mayor produce una solidificación rápida o tiempos de solidificación cortos. El tiempo t_s , requerido para que una pieza colada sencilla se solidifique por completo puede calcularse utilizando la *regla de Chvorinov*:

$$t_s = B \left(\frac{V}{A} \right)^n \quad (9-4)$$

donde V es el volumen de la pieza colada y representa la cantidad de calor que debe eliminarse antes de que ocurra la solidificación, A es el área de superficie de la pieza colada en contacto con el molde y representa la superficie a partir de la cual puede transferirse el calor fuera de la pieza colada, n es una constante (por lo regular de alrededor de 2) y B es la **constante del molde**. Esta constante depende de las propiedades y las temperaturas iniciales del metal y del molde. Esta regla explica de manera básica la geometría de una pieza colada y las condiciones de transferencia de calor. La regla enuncia que, para las mismas condiciones, una pieza colada con un volumen pequeño y un área de superficie relativamente grande se enfriará más rápido.

Ejemplo 9-2*Rediseño de una pieza colada para mejorar la solidificación*

Su compañía actualmente está produciendo una pieza colada de latón en forma de disco de 2 pulg de grosor y 18 pulg de diámetro. Cree que al hacer que la pieza colada se solidifique 25% más rápido, la mejora en las propiedades de tensión de la pieza colada permitirá que ésta sea más ligera. Diseñe la pieza colada que permita esto. Suponga que la constante del molde es de 22 min/pulg² para este proceso y $n = 2$.

SOLUCIÓN

Un método sería utilizar el mismo proceso de fundición, pero reducir el grosor de la pieza colada. La pieza colada más delgada se solidificará más rápido y, debido al enfriamiento más veloz, deben mejorarse las propiedades mecánicas. La regla de Chvorinov ayuda a calcular el grosor requerido. Si d es el diámetro y x es el grosor de la pieza colada, entonces el volumen, el área de superficie y el tiempo de solidificación de la pieza colada de 2 pulg de grosor son

$$V = (\pi/4)d^2x = (\pi/4)(18)^2(2) = 508.9 \text{ pulg}^3$$

$$A = 2(\pi/4)d^2 + \pi dx = 2(\pi/4)(18)^2 + \pi(18)(2) = 622 \text{ pulg}^2$$

$$t = B\left(\frac{V}{A}\right)^2 = (22)\left(\frac{508.9}{622}\right)^2 = 14.73 \text{ min}$$

El tiempo de solidificación t_r de la pieza colada rediseñada debe ser 25% menor al tiempo actual:

$$t_r = 0.75t = (0.75)(14.73) = 11.05 \text{ min}$$

Dado que las condiciones de pieza colada no han cambiado la constante del molde B no cambia. La razón V/A de la nueva pieza colada es

$$t_r = B\left(\frac{V_r}{A_r}\right)^2 = (22)\left(\frac{V_r}{A_r}\right)^2 = 11.05 \text{ min}$$

$$\left(\frac{V_r}{A_r}\right)^2 = 0.502 \text{ pulg}^2 \text{ o } \frac{V_r}{A_r} = 0.709 \text{ pulg}$$

Si x es el grosor requerido para esta pieza colada rediseñada, entonces:

$$\frac{V_r}{A_r} = \frac{(\pi/4)d^2x}{2(\pi/4)d^2 + \pi dx} = \frac{(\pi/4)(18)^2(x)}{2(\pi/4)(18)^2 + \pi(18)(x)} = 0.709 \text{ pulg}$$

Por tanto, $x = 1.68 \text{ pulg}$.

Este grosor provee el tiempo de solidificación requerido, mientras que la reducción del peso total de la pieza colada es mayor al 15%.

La solidificación comienza en la superficie, donde el calor se disipa en el material del molde que lo rodea. La rapidez de solidificación de una pieza colada puede describir qué tan rápido crece el grosor d de la corteza solidificada:

$$d = k_{\text{solidificación}}\sqrt{t} - c_1 \quad (9-5)$$

donde t es el tiempo después del vertido, $k_{\text{solidificación}}$ es una constante para un material de pieza colada y molde dados y c_1 es una constante relacionada con la temperatura del vertido.

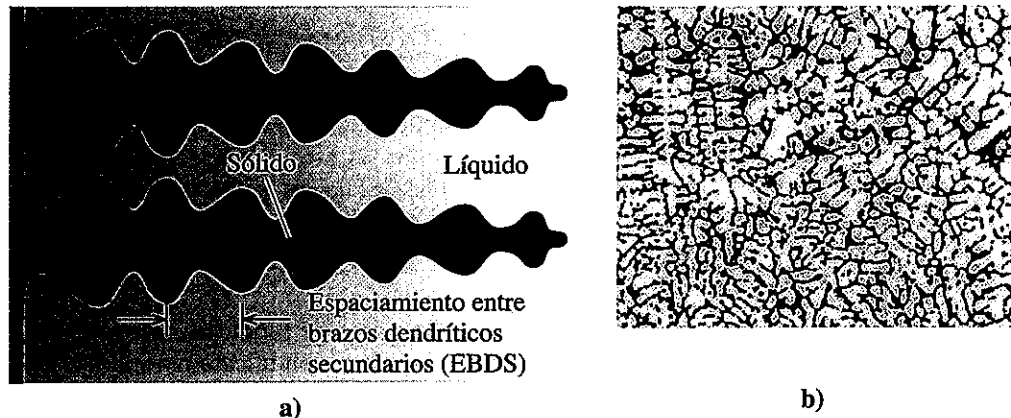


Figura 9-5 a) Espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios (EBDS). b) Dendritas en una aleación de aluminio (50×). (De ASM Handbook, vol. 9, *Metallography and Microstructure* (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.)

Efecto sobre la estructura y las propiedades El tiempo de solidificación afecta el tamaño de las dendritas. Por lo general, el tamaño de las dendritas se caracteriza midiendo la distancia entre los brazos dendríticos secundarios (figura 9-5). El **espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios (EBDS)** se reduce cuando la pieza se enfría de manera más rápida. La red dendrítica más fina y extensiva sirve como un conductor más eficiente del calor latente al líquido subenfriado. El EBDS se relaciona con el tiempo de solidificación por medio de

$$\text{EBDS} = kt_s^m \quad (9-6)$$

donde m y k son constantes que dependen de la composición del metal. Esta relación se muestra en la figura 9-6 para varias aleaciones. Los espaciamientos entre brazos dendríticos secundarios pequeños están asociados con resistencias más altas y ductilidad mejorada (figura 9-7).

El procesamiento de solidificación rápida se emplea para producir espaciamientos entre brazos dendríticos secundarios excepcionalmente finos; un método común es producir gotas líquidas muy finas que se solidifiquen en partículas sólidas. A este proceso se le conoce como atomización por rocío. Las gotas pequeñas se solidifican a una rapidez de alrededor de 10^4 °C/s, produciendo partículas de polvo que varían de ~ 5 - 100 μm . Esta rapidez de enfriamiento no es lo suficientemente rápida para formar un vidrio metálico, pero produce una estructura dendrítica fina. Al consolidar con cuidado las gotas sólidas por medio de los procesos de metalurgia de polvos, pueden obtenerse propiedades mejoradas en el material. Dado

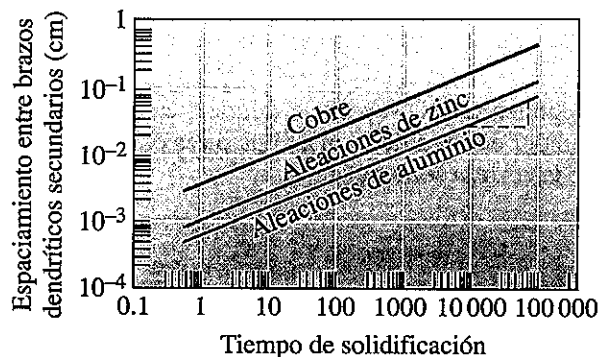


Figura 9-6 Efecto del tiempo de solidificación sobre los espaciamientos entre brazos dendríticos secundarios del cobre, zinc y aluminio.

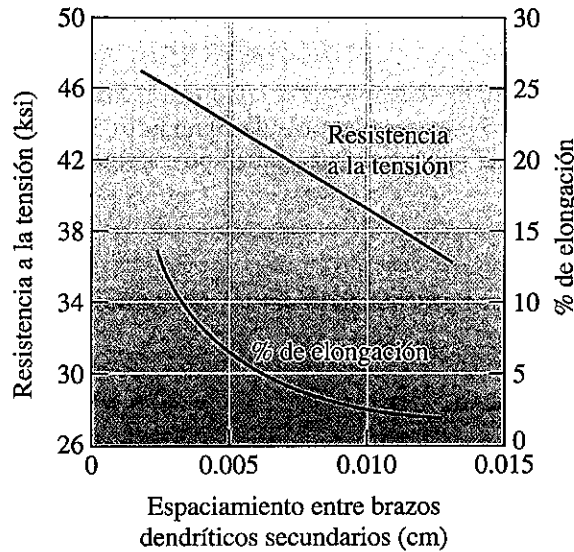


Figura 9-7
Efecto del espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios sobre las propiedades de una aleación fundida de aluminio.

que las partículas se derivan de una fusión, pueden producirse varias composiciones de aleaciones complejas en la forma de polvos homogéneos de manera química.

Los siguientes tres ejemplos explican cómo pueden utilizarse la regla de Chvorinov, la relación entre el EBDS y el tiempo de solidificación, y las propiedades mecánicas para diseñar procesos de fundición.

Ejemplo 9-3

Determine las constantes en la ecuación que describe la relación entre el espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios (EBDS) y el tiempo de solidificación para aleaciones de aluminio (figura 9-6).

SOLUCIÓN

Se puede obtener el valor del EBDS en dos tiempos a partir de la gráfica y calcular k y m utilizando ecuaciones simultáneas; sin embargo, si las escalas en la ordenada y en la abscisa son iguales para potencias de 10 (como en la figura 9-6), se puede obtener la pendiente m a partir de la gráfica log-log midiendo de manera directa la pendiente de la gráfica. En la figura 9-6 se pueden marcar cinco unidades iguales en la escala vertical y 12 unidades iguales en la escala horizontal. La pendiente es

$$m = \frac{5}{12} = 0.42$$

La constante k es el valor del EBDS donde $t_s = 1$ s, dado que

$$\log \text{EBDS} = \log k + m \log t_s$$

Si $t_s = 1$ s, $m \log t_s = 0$ y $\text{EBDS} = k$, a partir de la figura 9-6:

$$k = 7 \times 10^{-4} \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Ejemplo 9-4*Tiempo de solidificación*

Una barra de aluminio de 4 pulg de diámetro se solidifica hasta una profundidad de 0.5 pulg, bajo la superficie en 5 minutos. Después de 20 minutos, la barra se ha solidificado hasta una profundidad de 1.5 pulg. ¿Cuánto tiempo se requiere para que la barra se solidifique por completo?

SOLUCIÓN

A partir de estas mediciones, se pueden determinar las constantes $k_{\text{solidificación}}$ y c_1 en la ecuación 9-5:

$$\begin{aligned} 0.5 \text{ pulg} &= k_{\text{solidificación}} \sqrt{(5 \text{ min})} - c_1 \quad \text{o} \quad c_1 = k\sqrt{5} - 0.5 \\ 1.5 \text{ pulg} &= k_{\text{solidificación}} \sqrt{(20 \text{ min})} - c_1 = k\sqrt{20} - (k\sqrt{5} - 0.5) \\ 1.5 &= k_{\text{solidificación}}(\sqrt{20} - \sqrt{5}) + 0.5 \\ k_{\text{solidificación}} &= \frac{1.5 - 0.5}{4.472 - 2.236} = 0.447 \frac{\text{pulg}}{\sqrt{\text{min}}} \\ c_1 &= (0.447)\sqrt{5} - 0.5 = 0.5 \text{ pulg} \end{aligned}$$

La solidificación se completa cuando $d = 2$ pulg (la mitad del diámetro, dado que se está llevando a cabo a partir de todas las superficies):

$$\begin{aligned} 2 &= 0.447\sqrt{t} - 0.5 \\ \sqrt{t} &= \frac{2 + 0.5}{0.447} = 5.59 \\ t &= 31.25 \text{ min} \end{aligned}$$

En la práctica real, se encontraría que el tiempo de solidificación total es un poco mayor a 31.25 min. A medida que la solidificación continúa, el molde se vuelve más caliente y es menos efectivo en la eliminación del calor de la pieza colada.

Ejemplo 9-5*Diseño de una pieza colada de una aleación de aluminio*

Diseñe el grosor de una pieza colada de una aleación de aluminio con una longitud de 12 pulg, un ancho de 8 pulg y una resistencia a la tensión de 40 000 psi. La constante del molde en la regla de Chvorinov para la fundición de las aleaciones de aluminio es de 45 min/pulg². Suponga que puede utilizarse la información mostrada en las figuras 9-6 y 9-7.

SOLUCIÓN

Para obtener una resistencia a la tensión de 42 000 psi, se requiere un espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios de alrededor de 0.007 cm (véase la figura 9-7). A partir de la figura 9-6 se puede determinar que el tiempo de solidificación requerido para obtener este espaciamiento es alrededor de 300 s o 5 minutos.

Según la regla de Chvorinov

$$t_s = B \left(\frac{V}{A} \right)^2$$

donde $B = 45 \text{ min/pulg}^2$ y x es el grosor de la pieza. Dado que la longitud es de 12 pulg y el ancho es de 8 pulg,

$$V = (8)(12)(x) = 96x$$

$$A = (2)(8)(12) + (2)(x)(8) + (2)(x)(12) = 40x + 192$$

$$5 \text{ min} = (45 \text{ min/pulg}^2) \left(\frac{96x}{40x + 192} \right)^2$$

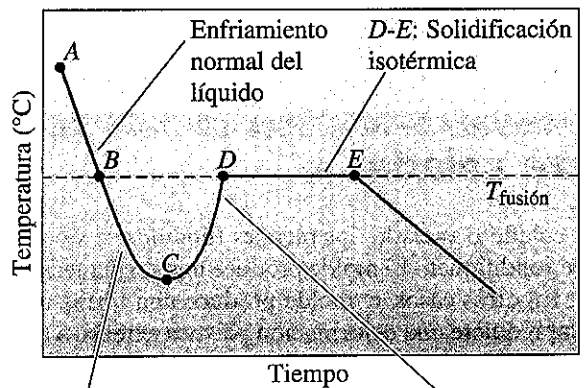
$$\frac{96x}{40x + 192} = \sqrt{(5/45)} = 0.333$$

$$96x = 13.33x + 64$$

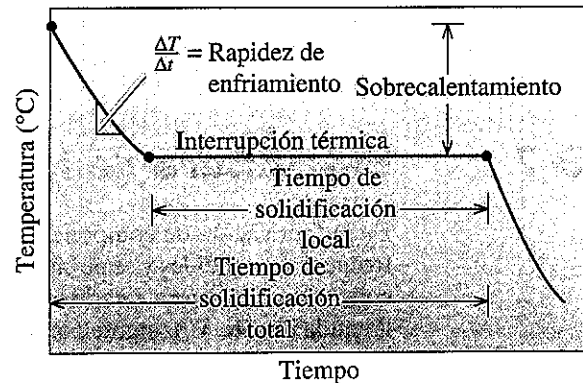
$$x = 0.77 \text{ pulg}$$

9-6 Curvas de enfriamiento

La explicación en este punto se puede resumir examinando las curvas de enfriamiento. Una curva de enfriamiento muestra cómo disminuye con el tiempo la temperatura de un material (en este caso, un metal puro) [figura 9-8a) y b)]. El líquido se vierte en un molde a la temperatura del vertido, punto A . La diferencia entre la temperatura del vertido y la temperatura de solidificación es el sobrecalentamiento. El calor específico lo extrae el molde hasta que el líquido alcanza la temperatura de solidificación (punto B). Si el líquido no está bien inoculado, debe subenfriarse (punto B a C). La pendiente de la curva de enfriamiento antes de que comience la



a)



b)

Figura 9-8 a) Curva de enfriamiento para un metal puro que no ha sido bien inoculado. El líquido se enfría a medida que se elimina el calor específico (entre los puntos A y B). Por tanto es necesario el subenfriamiento (entre los puntos B y C). A medida que comienza la formación de núcleos (punto C), se libera el calor latente de fusión ocasionando un incremento en la temperatura del líquido. A este proceso se le conoce como recalencia (punto C al punto D). El metal continúa solidificándose a una temperatura constante ($T_{\text{fusión}}$). En el punto E , se completa la solidificación. La pieza colada sólida continúa enfriándose desde este punto. b) Curva de enfriamiento para un metal bien inoculado, que de otra manera sería puro. No se necesita subenfriamiento. No se observa recalencia. La solidificación comienza a la temperatura de fusión.

solidificación es la rapidez de enfriamiento $\frac{\Delta T}{\Delta t}$. A medida que empieza la formación de núcleos (punto *C*), se elimina el calor latente de fusión y se eleva la temperatura. A este incremento en la temperatura del líquido subenfriado como resultado de la formación de núcleos se le conoce como **recallescencia** (punto *C* a *D*). La solidificación procede de manera isotérmica a la temperatura de fusión (punto *D* a *E*) a medida que el calor latente perdido de la solidificación continua es balanceado por el calor perdido por el enfriamiento. A esta región entre los puntos *D* y *E*, donde la temperatura es constante, se le conoce como **interrupción térmica**. Se produce una interrupción, o meseta, térmica debido a que la evolución del calor latente de fusión equilibra el calor que se está perdiendo debido al enfriamiento. En el punto *E* se completa la solidificación y la pieza colada sólida se enfría del punto *E* a la temperatura ambiente.

Si el líquido está bien inoculado, la extensión del subenfriamiento y la recallescencia por lo general son muy pequeñas y sólo puede observarse en las curvas de enfriamiento por medio de mediciones muy cuidadosas. Si se presentan en el líquido núcleos heterogéneos efectivos, la solidificación comienza a la temperatura de solidificación [figura 9-8b)]. El calor latente mantiene el líquido restante a la temperatura de solidificación hasta que todo el líquido se ha solidificado y no puede evolucionar más calor. El crecimiento en estas condiciones es plano. El **tiempo de solidificación total** de la pieza colada es el tiempo requerido para eliminar el calor específico del líquido y el calor latente de fusión. Medido desde el tiempo del vertido hasta que se completa la solidificación, este tiempo está dado por la regla de Chvorinov. El **tiempo de solidificación local** es el tiempo requerido para eliminar sólo el calor latente de fusión en una localización en particular en la pieza colada; se mide desde que comienza la solidificación hasta que se completa la solidificación. Los tiempos de solidificación locales (y los tiempos de solidificación totales) para los líquidos solidificados por subenfriamiento y los líquidos inoculados serán ligeramente distintos.

Con frecuencia se utilizan los términos “temperatura de fusión” y “temperatura de solidificación” mientras se explica la solidificación. Sería más preciso utilizar el término “temperatura de fusión” para describir cuando un sólido se convierte por completo en un líquido. Para los metales y compuestos puros, esto sucede a una temperatura fija (suponiendo una presión fija) y sin sobrecalentamiento. La “temperatura de solidificación” o “punto de solidificación” puede definirse como la temperatura a la que se completa la solidificación de un material.

9-7

Estructura de la pieza colada

En la fabricación de componentes por colado o vaciado, los metales fundidos se vierten con frecuencia en moldes y se permite que se solidifiquen. El molde produce una forma terminada, conocida como *pieza colada* o *vaciada*. En otros casos, el molde produce una forma sencilla, llamada **lingote**. Un lingote por lo regular requiere una deformación plástica extensiva antes de que se cree un producto terminado. Una **macroestructura** en algunas ocasiones referida como **estructura de lingote**, consiste en hasta tres regiones (figura 9-9). (Recuerde que en el capítulo 2 se utilizó el término “macroestructura” para describir la estructura de un material a una escala macroscópica. Por tanto, el término “estructura de lingote” puede ser más apropiado.)

Zona de enfriamiento La **zona de enfriamiento** es una banda estrecha de granos orientados de manera aleatoria en la superficie de la pieza colada. El metal en la pared del molde es el primero en enfriarse a la temperatura de solidificación. La pared del molde también provee varias superficies en las que tiene lugar la nucleación heterogénea.

Zona columnar La **zona columnar** contiene granos alargados orientados en una dirección cristalográfica en particular. A medida que el calor de la pieza colada es eliminado por el material en el molde, los granos en la zona de enfriamiento crecen en la dirección

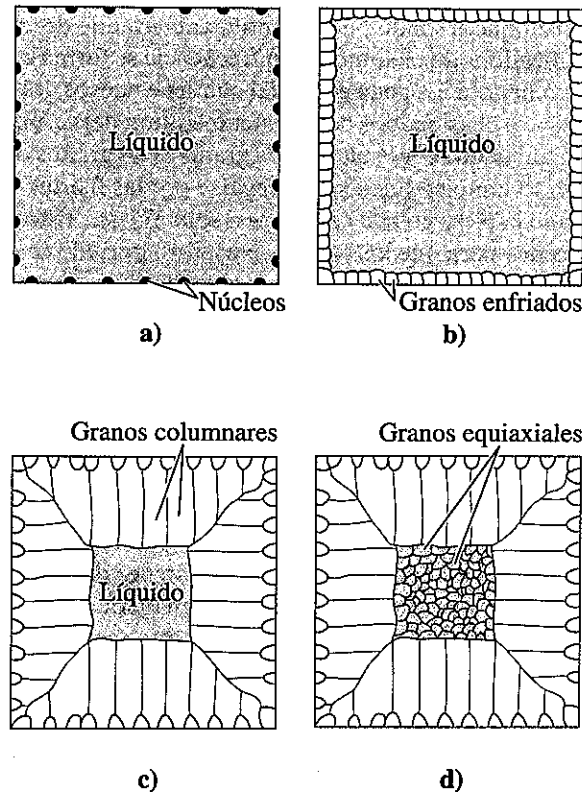


Figura 9-9
Desarrollo de la estructura de lingote de una pieza colada durante la solidificación: a) comienza la formación de núcleos, b) se forma la zona de enfriamiento, c) el crecimiento preferido produce la zona columnar y d) la formación de núcleos adicional crea la zona equiaxial.

opuesta al flujo del calor o del área más fría a la más caliente de la pieza colada. Esta tendencia por lo general significa que los granos crecen perpendiculares a la pared del molde.

Los granos crecen más rápido en ciertas direcciones cristalográficas. En los metales con una estructura cristalina cúbica, los granos en la zona de enfriamiento que tienen una dirección $\langle 100 \rangle$ perpendicular a la pared del molde crecen más rápido que los otros granos orientados de manera menos favorable (figura 9-10). Con el tiempo, los granos en la zona columnar tienen direcciones $\langle 100 \rangle$ que son paralelas entre sí, lo que da a la zona columnar propiedades anisotrópicas. Esta formación de la zona columnar está influida principalmente por el fenómeno del crecimiento —en vez de por la formación de núcleos—. Los granos pueden estar compuestos por muchas dendritas si el líquido está originalmente subenfriado. La solidificación puede proceder por medio del crecimiento planar de los granos columnares si no ocurre el subenfriamiento.

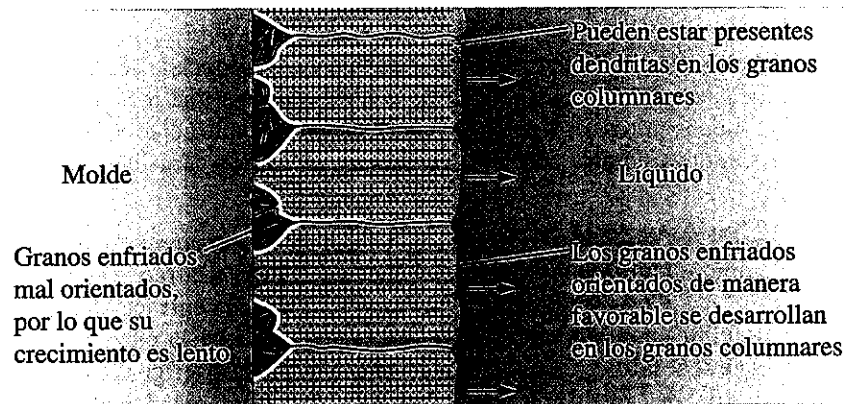


Figura 9-10 El crecimiento competitivo de los granos en la zona de enfriamiento da como resultado que sólo aquellos granos con orientaciones favorables se desarrollen en granos columnares.

Zona equiaxial Aunque el sólido puede continuar creciendo de una manera columnar hasta que se haya solidificado todo el líquido, con frecuencia se forma una zona equiaxial en el centro de la fundición o lingote. La **zona equiaxial** contiene nuevos granos orientados de manera aleatoria, con frecuencia ocasionados por una temperatura del vertido baja, elementos de aleación o agentes de refinamiento o inoculación de granos. Los granos o dendritas pequeños en la zona de enfriamiento también pueden disgregarse por las fuertes corrientes de convección que se forman cuando la pieza colada comienza a solidificarse. Éstos también proveen sitios de nucleación heterogénea para que los granos se vuelvan por último equiaxiales. Estos granos crecen como granos relativamente redondos, o equiaxiales, con una orientación aleatoria, y detienen el crecimiento de los granos columnares. La formación de la zona equiaxial es un proceso controlado por formación de núcleos y ocasiona que la porción de la pieza colada muestre comportamiento isotrópico.

Al comprender los factores que influyen en la solidificación en las distintas regiones, es posible producir piezas coladas que formen primero una "corteza" de una zona de enfriamiento y después dendritas. A los metales y aleaciones que muestran esta macroestructura se les conocen como **aleaciones de formación de corteza**. También se puede controlar la solidificación de tal manera que no se observe una corteza o los arreglos de granos dendríticos avanzados; el cambio columnar a equiaxial ocurre cerca de las paredes del molde. El resultado es una pieza colada con una macroestructura que consiste de manera predominante en granos equiaxiales. A los metales y aleaciones que se solidifican de esta manera se les conoce como **aleaciones de formación de pasta** dado que el material fundido se parece a una pasta de granos sólidos que flotan en una fusión líquida. Muchas aleaciones de aluminio y magnesio muestran este tipo de solidificación. Con frecuencia, se fomenta una estructura totalmente equiaxial y por tanto se crea una pieza colada con propiedades isotrópicas por medio del refinamiento o inoculación efectiva de los granos. En una sección posterior, se examinará un caso (álabes de turbinas) donde se controla la solidificación para fomentar que todos los granos sean columnares y por tanto presenten un comportamiento anisotrópico.

La estructura y la microestructura de lingote fundido son muy importantes en particular para componentes que se vierten de manera directa en una forma final. Sin embargo, en varias situaciones, como se explicó en la sección 9-1, los metales y aleaciones se vierten primero en lingotes y éstos se sujetan de manera subsecuente al procesamiento termomecánico (por ejemplo, laminado, forjado, etc.). Durante estas etapas, la macroestructura de la pieza colada se descompone y emergerá una nueva microestructura, dependiendo del proceso termomecánico empleado (capítulo 8).

9-8 Defectos de solidificación

Aunque existen varios defectos que pueden introducirse de manera potencial durante la solidificación, la contracción y la porosidad merecen una mención especial. Si una pieza colada contiene poros (orificios pequeños), el componente colado puede fallar de manera catastrófica cuando se emplea para aplicaciones de soporte de carga (por ejemplo, álabes de turbinas).

Contracción Casi todos los materiales son más densos en el estado sólido que en el líquido. Durante la solidificación, el material se contrae, o encoge, hasta un 7% (tabla 9-2).

Con frecuencia, la mayor parte de las **contracciones** ocurre como **cavidades**, si la solidificación comienza en todas las superficies de la pieza colada, o **rechupes**, si una superficie se solidifica de manera más lenta que las otras (figura 9-11). La presencia de tales rechupes puede causar problemas. Por ejemplo, si en la producción de lingotes de zinc permanece un rechupe de contracción, el vapor de agua puede condensarse en él. Esta agua puede conducir a una explosión si el lingote se introduce en un horno en el que el zinc se va a volver a fundir para aplicaciones como el galvanizado por inmersión en caliente.

TABLA 9-2 ■ Contracción durante la solidificación para materiales seleccionados

Material	Contracción (%)
Al	7.0
Cu	5.1
Mg	4.0
Zn	3.7
Fe	3.4
Pb	2.7
Ga	+3.2 (expansión)
H ₂ O	+8.3 (expansión)
Acero al bajo carbono	2.5-3.0
Acero al alto carbono	4.0
Hierro colado blanco	4.0-5.5
Hierro colado gris	+1.9 (expansión)

Nota: Parte de la información de DeGarmo, E. P., Black, J. T. y Koshe, R. A., Materials and Processes in Manufacturing, Prentice Hall, 1997.

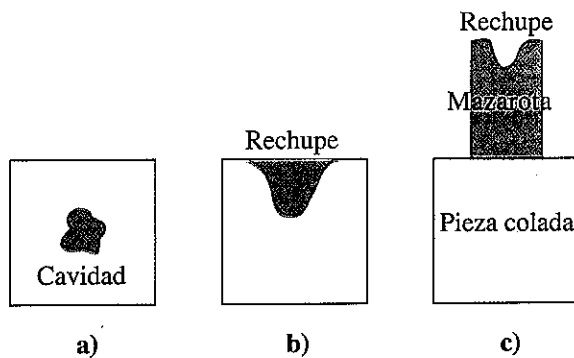


Figura 9-11

Pueden ocurrir varios tipos de macrocontracción, incluyendo cavidades y rechufes. Pueden utilizarse mazarotas para ayudar a compensar la contracción.

Una técnica común para controlar la **contracción por cavidades** y por **rechufes** es colocar una **mazarota**, o una reserva adicional del metal, adyacente y conectado a la pieza colada. A medida que la pieza colada se solidifica y se encoge, el metal líquido fluye de la mazarota a la pieza colada para llenar el vacío por la contracción. Sólo se necesita asegurar que la mazarota se solidifique después que la pieza colada y que haya un canal líquido interno que conecte el líquido en la mazarota con el último líquido a solidificarse en la pieza colada. Puede emplearse la regla de Chvorinov como ayuda para el diseño del tamaño de la mazarota. El siguiente ejemplo ilustra cómo pueden diseñarse mazarotas que compensen la contracción.

Ejemplo 9-6

Diseño de una mazarota para una pieza colada

Diseñe una mazarota cilíndrica, con una altura igual al doble de su diámetro, que compensará la contracción en una pieza colada de $2 \times 8 \times 16$ cm (figura 9-12).

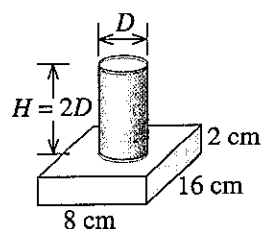


Figura 9-12

Geometría de la pieza colada y la mazarota (para el ejemplo 9-6).

SOLUCIÓN

Se sabe que la mazarota debe solidificarse después que la pieza colada. Para ser conservador, por lo regular se requiere que la mazarota tarde 25% más en solidificarse que la pieza colada. Por tanto,

$$t_r = 1.25t_c \text{ o } B\left(\frac{V}{A}\right)_r^2 = 1.25 B\left(\frac{V}{A}\right)_c^2$$

Los subíndices m y f representan la mazarota y la pieza colada, respectivamente. La constante del molde B es la misma para la pieza colada y la mazarota, por lo que

$$\left(\frac{V}{A}\right)_r = \sqrt{1.25}\left(\frac{V}{A}\right)_c$$

El volumen de la pieza colada es

$$V_c = (2 \text{ cm})(8 \text{ cm})(16 \text{ cm}) = 256 \text{ cm}^3$$

El área de la mazarota unida a la pieza colada debe restarse del área total de superficie de la pieza colada para calcular el área de superficie de la pieza colada en contacto con el molde:

$$A_c = (2)(2 \text{ cm})(8 \text{ cm}) + (2)(2 \text{ cm})(16 \text{ cm}) + (2)(8 \text{ cm})(16 \text{ cm}) - \frac{\pi D^2}{4} = 352 \text{ cm}^2 - \frac{\pi D^2}{4}$$

Donde D es el diámetro de la mazarota cilíndrica. Se pueden escribir las ecuaciones para el volumen y el área de la mazarota cilíndrica, observando que la altura del cilindro $H = 2D$:

$$V_r = \frac{\pi D^2}{4} H = \frac{\pi D^2}{4} (2D) = \frac{\pi D^3}{2}$$

$$A_r = \frac{\pi D^2}{4} + \pi D H = \frac{\pi D^2}{4} + \pi D (2D) = \frac{9}{4} \pi D^2$$

donde de nuevo no se ha incluido el área de la mazarota unida a la pieza colada en el cálculo del área. La razón volumen a área de la mazarota está dada por

$$\left(\frac{V}{A}\right)_r = \frac{(\pi D^3/2)}{(9\pi D^2/4)} = \frac{2}{9} D$$

y debe ser mayor que la de la pieza colada de acuerdo con

$$\left(\frac{V}{A}\right)_r = \frac{2}{9} D > \sqrt{1.25}\left(\frac{V}{A}\right)_c$$

Al sustituir,

$$\frac{2}{9} D > \sqrt{1.25}\left(\frac{256 \text{ cm}^3}{352 \text{ cm}^2 - \pi D^2/4}\right)$$

Al resolver para el diámetro más pequeño de la mazarota:

$$D = 3.78 \text{ cm}$$

Aunque el volumen de la mazarota es menor que el de la pieza colada, la mazarota se solidifica más lentamente debido a su forma compacta.

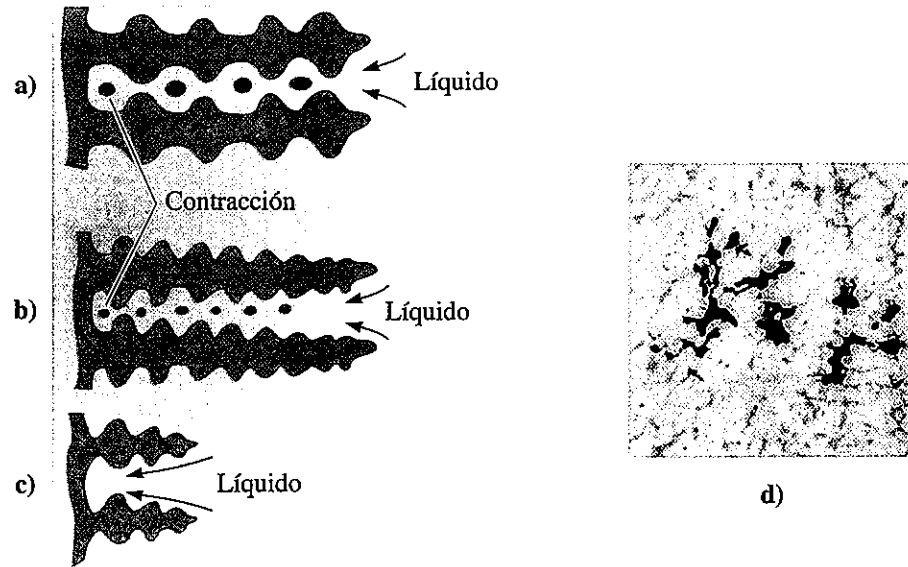


Figura 9-13 a) Puede ocurrir una contracción entre los brazos de dendritas. b) Los espaciamientos entre brazos dendríticos secundarios pequeños dan por resultado una porosidad por contracción más pequeña distribuida de manera más pareja. c) Los brazos primarios cortos pueden ayudar a evitar la contracción. d) Se muestra la contracción interdendrítica en una aleación de aluminio. (Reimpresión cortesía de Don Askeland.)

Contracción interdendrítica Consiste en poros por contracción pequeños entre las dendritas (figura 9-13). Este defecto, también llamado **microcontracción** o **porosidad por contracción**, es difícil de prevenir por medio del uso de mazas. Las rapidezces de enfriamiento rápidas pueden reducir los problemas con la **contracción interdendrítica**; las dendritas pueden acortarse, permitiendo que el líquido fluya a través de la red dendrítica a la interfaz sólida solidificándose. Además, cualquier contracción que permanezca puede distribuirse de manera más fina y uniforme.

Porosidad gaseosa Muchos metales disuelven una gran cantidad de gas cuando se funden. Por ejemplo, el aluminio disuelve hidrógeno. Sin embargo, cuando el aluminio se solidifica el metal sólido sólo retiene en su estructura cristalina una pequeña fracción del hidrógeno dado que la solubilidad es notablemente menor que la del líquido (figura 9-14). El exceso de hidrógeno que no puede incorporarse en la estructura cristalina del metal o aleación sólida forma burbujas que pueden quedarse atrapadas en el metal sólido, produciendo **porosidad gaseosa**. La cantidad de gas que puede disolverse en el metal fundido está dada por la ley de Sievert:

$$\text{Porcentaje de gas} = K\sqrt{p_{\text{gas}}} \quad (9-7)$$

donde p_{gas} es la presión parcial del gas en contacto con el metal y K es una constante la cual, para un sistema metal-gas en particular, aumenta con el incremento de temperatura. Se puede minimizar la porosidad gaseosa en las piezas coladas manteniendo el líquido a una temperatura baja, adicionando materiales al líquido para que se combinen con el gas y formen un sólido o asegurándose de que la presión parcial del gas permanezca baja. Lo último puede lograrse colocando el metal fundido en una cámara de vacío o burbujeando un gas inerte a través del metal. Debido a que la p_{gas} es baja en el vacío, el gas abandona el metal, entra al vacío y es

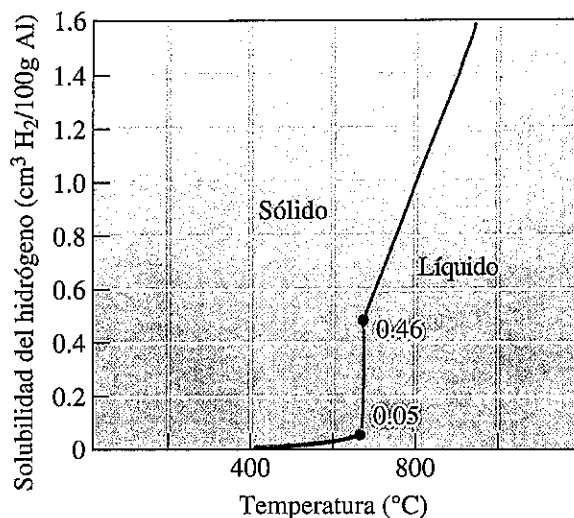


Figura 9-14
Solubilidad del gas hidrógeno en aluminio cuando la presión parcial del $H_2 = 1$ atm.

sustraído. El **lavado con gas** es un proceso en el que se inyectan burbujas de un gas, inerte o reactivo, en un metal fundido para eliminar los elementos indeseables de los metales y aleaciones fundidos. Por ejemplo, el hidrógeno en el aluminio puede eliminarse utilizando nitrógeno o cloro. El siguiente ejemplo ilustra cómo puede diseñarse un proceso de desgasificación.

Ejemplo 9-7

Diseño de un proceso de desgasificación para el cobre

Después de fundirse a presión atmosférica, el cobre fundido contiene un porcentaje en peso de 0.01 de oxígeno. Para asegurar que sus fundiciones no estarán sujetas a porosidad gaseosa, desea reducir el porcentaje en peso a menos del 0.00001% antes del vertido. Diseñe un proceso de desgasificación para el cobre.

SOLUCIÓN

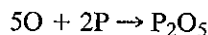
Este problema puede resolverse de varias maneras. En un método el cobre líquido se coloca en una cámara de vacío; después se extrae el oxígeno del líquido y se saca al vacío. El vacío requerido puede calcularse a partir de la ley de Sievert:

$$\frac{\% O_{\text{inicial}}}{\% O_{\text{vacío}}} = \frac{K \sqrt{p_{\text{inicial}}}}{K \sqrt{p_{\text{vacío}}}} = \sqrt{\left(\frac{1 \text{ atm}}{p_{\text{vacío}}} \right)}$$

$$\frac{0.01\%}{0.00001\%} = \sqrt{\left(\frac{1}{p_{\text{vacío}}} \right)}$$

$$\frac{1 \text{ atm}}{p_{\text{vacío}}} = (1000)^2 \quad \text{o} \quad p_{\text{vacío}} = 10^{-6} \text{ atm}$$

Otro método sería introducir una aleación de cobre al 15% de fósforo. El fósforo reacciona con el oxígeno para producir P_2O_5 , el cual flota sobre el líquido, por medio de la reacción:



Por lo regular, debe adicionarse alrededor de 0.01 a 0.02% de P para eliminar el oxígeno.

En la fabricación de **acero inoxidable**, se utiliza un proceso conocido como **descarburación con oxígeno y argón (DOA)** para disminuir el contenido de carbono de la fundición sin oxidar el cromo o el níquel. En este proceso, se fuerza una mezcla de argón (o nitrógeno) y oxígeno en el acero inoxidable fundido. El carbono disuelto en el acero fundido es oxidado por el gas oxígeno por medio de la formación de gas monóxido de carbono (CO); el CO es extraído por las burbujas de gas argón (o nitrógeno) inerte. Estos procesos necesitan un control muy cuidadoso dado que algunas reacciones (por ejemplo, la oxidación del carbono a CO) son exotérmicas (generan calor).

9-9

Procesos de vaciado para la fabricación de componentes

La figura 9-15 resume cuatro de las docenas de procesos de vaciado comerciales. En algunos procesos pueden reutilizarse los moldes; en otros el molde es desechable. El proceso de **vaciado en arena** incluye el moldeo en arena verde, para el que los granos de arena de sílice (SiO_2) son aglutinados con arcilla húmeda y se empaquetan alrededor de un patrón sustraible. Los procesos de vaciado de cerámicas emplean un material cerámico de granos finos como molde, ya que la lechada que contiene la cerámica puede verterse alrededor de un patrón reutilizable, el cual se sustrae después de que la cerámica se endurece. En el **vaciado por revestimiento**, la lechada cerámica de un material como la sílice coloidal (que consiste en nanopartículas cerámicas), reviste un patrón de cera. Después de que la cerámica se endurece (es decir, los geles de la dispersión de la sílice coloidal), la cera se funde y se drena del armazón cerámico, dejando una cavidad que se llena con el metal fundido. Después de que el metal se solidifica, el molde se rompe para sustraer la pieza. El proceso de vaciado por revestimiento, también conocido como **proceso a la cera perdida**, es el más adecuado para la generación de formas complejas. Los dentistas y joyeros empleaban originalmente la precisión del proceso de vaciado por revestimiento. En la actualidad, este proceso se utiliza para producir componentes como álabes de turbinas, cabezas de titanio de palos de golf y partes de prótesis para rodilla o cadera. En otro proceso conocido como **proceso a la espuma perdida** se emplean perlas de poliestireno, de manera similar a las utilizadas para hacer tazas para café o materiales de empaque, para producir un patrón espumoso. La arena suelta se compacta alrededor del patrón para producir un molde. Cuando se vierte el metal fundido en el molde, el patrón de espuma del polímero se funde y se descompone, con el metal tomando el lugar del patrón.

En los procesos de vaciado en molde permanente y a presión en matriz, se maquina una cavidad en el material metálico. Después de que el líquido vertido en la cavidad se solidifica, se abre el molde, se sustrae la pieza colada y se reutiliza el molde. Los procesos que emplean

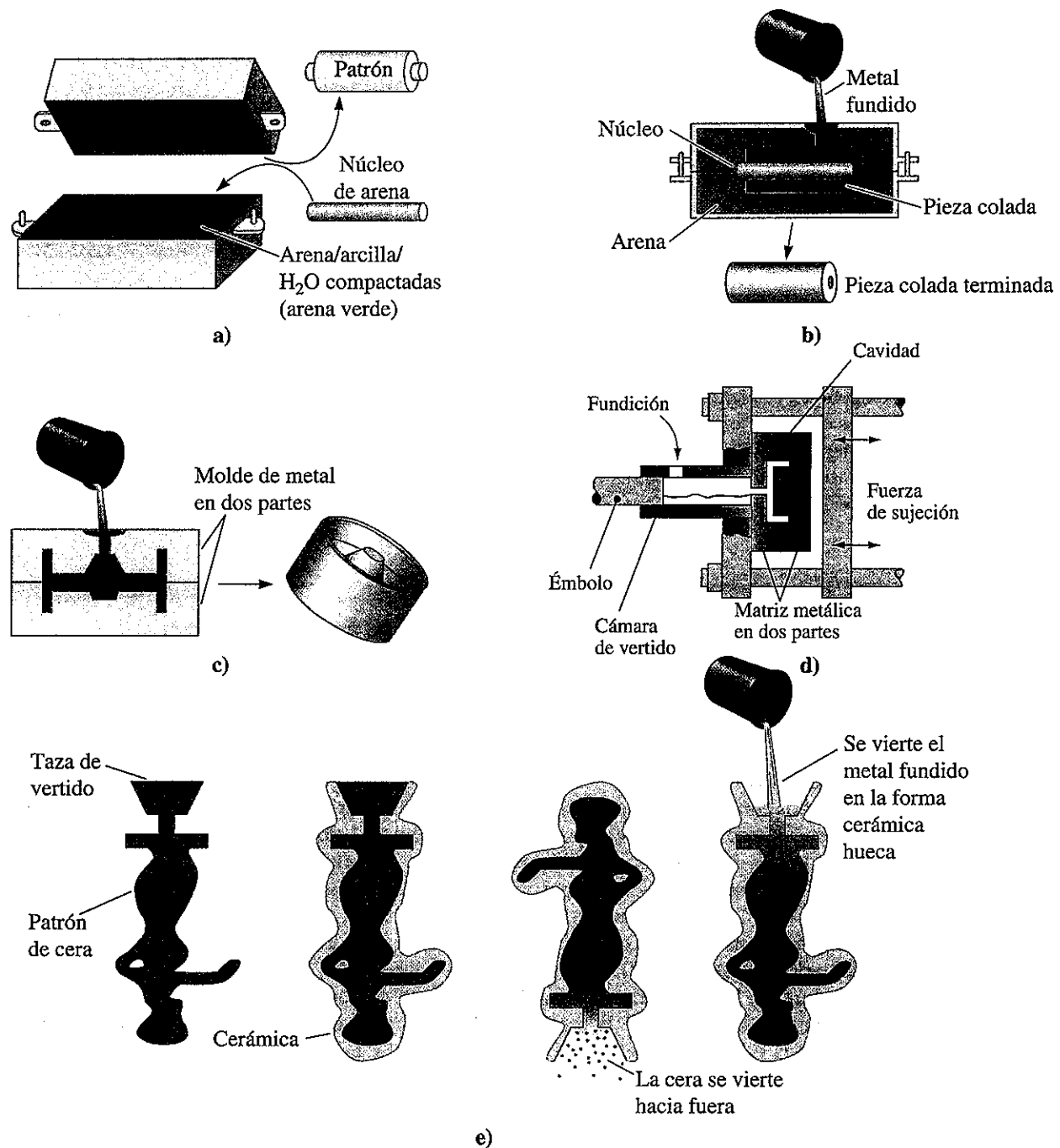


Figura 9-15 Cuatro procesos de fundición comunes: a) y b) Moldeo en arena verde, en el que se compacta arena arcillosa alrededor de un patrón. Los núcleos de arena pueden producir cavidades internas en la pieza colada. c) Proceso en molde permanente, en el que se vierte el metal en un molde de hierro o acero. d) Vaciado en matriz, en el que el metal se inyecta a presión alta en una matriz de acero. e) Vaciado por revestimiento o a la cera perdida, en el que el patrón de cera es rodeado por una cerámica; después de que se funde y se drena la cera, se vierte el metal en el molde.

moldes metálicos tienden a dar las fundiciones con las resistencias más altas debido a la solidificación rápida. Los moldes de cerámica, incluidos los utilizados en la fundición por revestimiento, son buenos aislantes y dan las piezas coladas con el enfriamiento más lento y la resistencia más baja. Millones de pistones para camiones y automóviles se fabrican en fundiciones que emplean el vaciado en molde permanente. El buen acabado de la superficie y la precisión dimensional son las ventajas de la técnica de **vaciado en molde permanente**. Los altos costos del molde y la complejidad limitada en la forma son las limitaciones de esta técnica.

En el **vaciado en matriz a presión**, el material metálico fundido se fuerza en la matriz bajo presiones altas y se mantiene bajo presión durante la solidificación. Muchas aleaciones basadas en zinc, aluminio y magnesio se procesan empleando la fundición en matriz a presión. Los acabados de superficie extremadamente lisos, la precisión dimensional muy buena, la capacidad para colar formas intrincadas y las altas rapidez de producción son las ventajas del proceso de fundición en matriz a presión. Dado que la matriz es metálica y debe soportar presiones altas, las matrices empleadas son costosas y la técnica se limita a componentes de tamaño más pequeño.

9-10 Colada continua y vaciado de lingotes

Como se explicó en la sección anterior, el vaciado es una herramienta empleada para la fabricación de componentes. También es un proceso para producir lingotes o bloques que pueden procesarse posteriormente en formas distintas (por ejemplo, varillas, barras, alambres, etc.). En la industria del acero, se producen millones de libras de acero utilizando altos hornos,

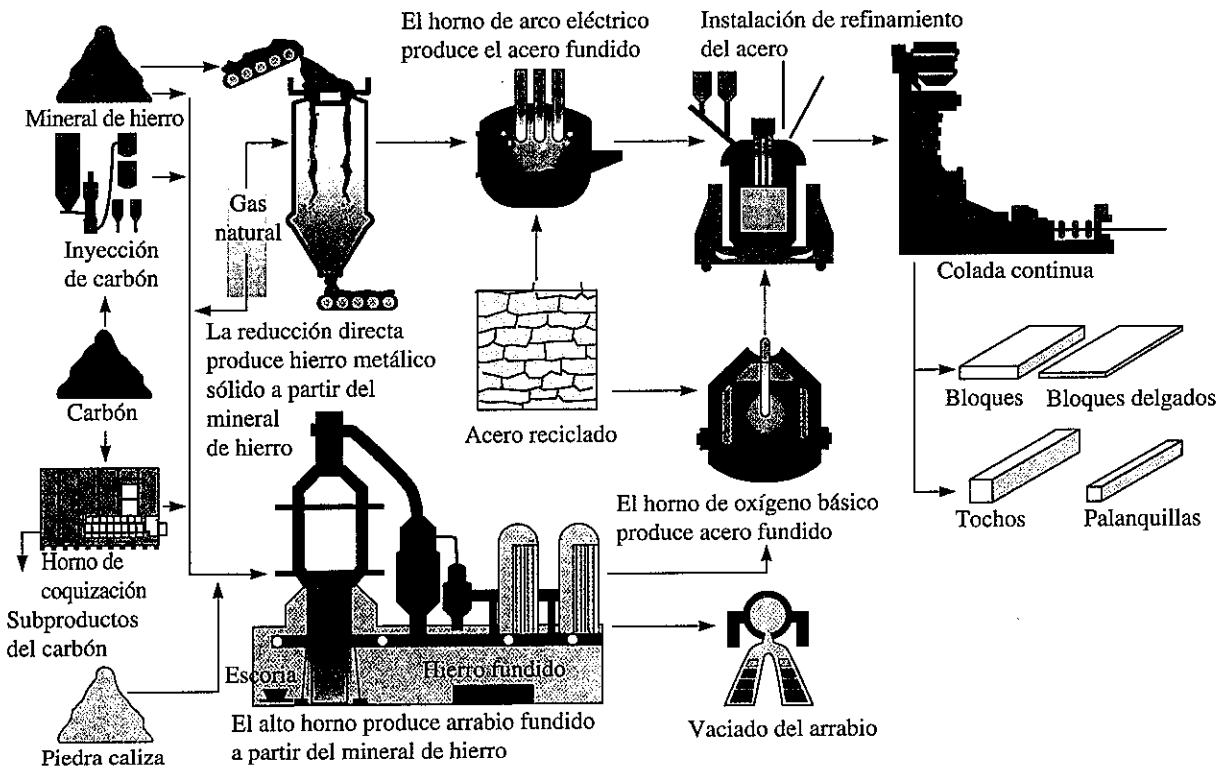


Figura 9-16 Resumen de las etapas en la extracción de aceros empleando minerales de hierro, coque y piedra caliza. (Fuente: www.steel.org. Utilizada con permiso del American Iron and Steel Institute.)

hornos de arco eléctrico y otros procesos. La figura 9-16 muestra un resumen de las etapas para extraer aceros utilizando minerales de hierro, coque y piedra caliza. Aunque los detalles varían, la mayoría de los metales y aleaciones (por ejemplo, el cobre y el zinc) se extraen de sus minerales utilizando procesos similares. Ciertos metales, como el aluminio, se producen empleando un proceso electrolítico dado que el óxido de aluminio es muy estable y puede que no sea tan fácil de reducir a metal aluminio utilizando coque u otros agentes reductores.

En muchos casos, se comienza con chatarra y aleaciones reciclables. En este caso, se funde y se procesa la chatarra, se remueven las impurezas y se ajusta la composición. Cada año se reciclan cantidades considerables de acero, aluminio, zinc, acero inoxidable, titanio y muchos otros materiales.

En el **vaciado de lingotes** se obtienen aceros o aleaciones fundidas en un horno y se vacían en moldes grandes. Las piezas resultantes, llamadas lingotes, se procesan para su conversión en formas útiles por medio de un procesamiento termomecánico, con frecuencia en otra localización. En el proceso de **colada continua**, la idea es pasar del material metálico fundido a una forma "semiterminada" un poco más útil tal como una placa, un bloque, etc. La figura 9-17 ilustra un método común para la producción de placas y barras de acero. El metal líquido se suministra desde un recipiente contenedor (una artesa de colada) a un molde oscilante de cobre enfriado con agua, el cual enfría de manera rápida la superficie del acero. El acero parcialmente solidificado se sustrae del molde a la misma rapidez que se introduce el acero líquido adicional. El centro de la pieza colada de acero se solidifica bastante después de que la pieza colada sale del molde. El material colado de manera continua se corta en longitudes apropiadas por medio de máquinas de corte especiales.

La pieza colada continua es rentable para el procesamiento de muchos aceros, aceros inoxidables y aleaciones de aluminio. El vaciado en lingotes también es rentable y empleado para muchos aceros donde no se dispone de una colada continua o la capacidad es limitada y para aleaciones de metales no ferrosos (por ejemplo, zinc, cobre) donde los volúmenes son relativamente pequeños y el gasto de capital necesario para una colada continua puede no ser justificable. Además, no todas las aleaciones pueden colarse empleando el proceso de fundición continua.

En la figura 9-18 se muestran las etapas de procesamiento secundarias en el procesamiento de aceros y otras aleaciones.

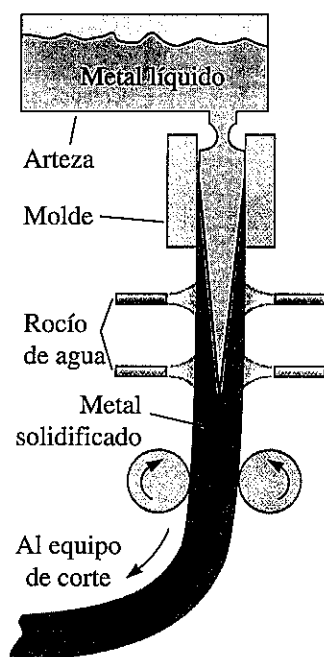


Figura 9-17

Colada continua vertical, empleada en la producción de muchos productos de acero. El metal líquido contenido en la artesa se solidifica de manera parcial en un molde.

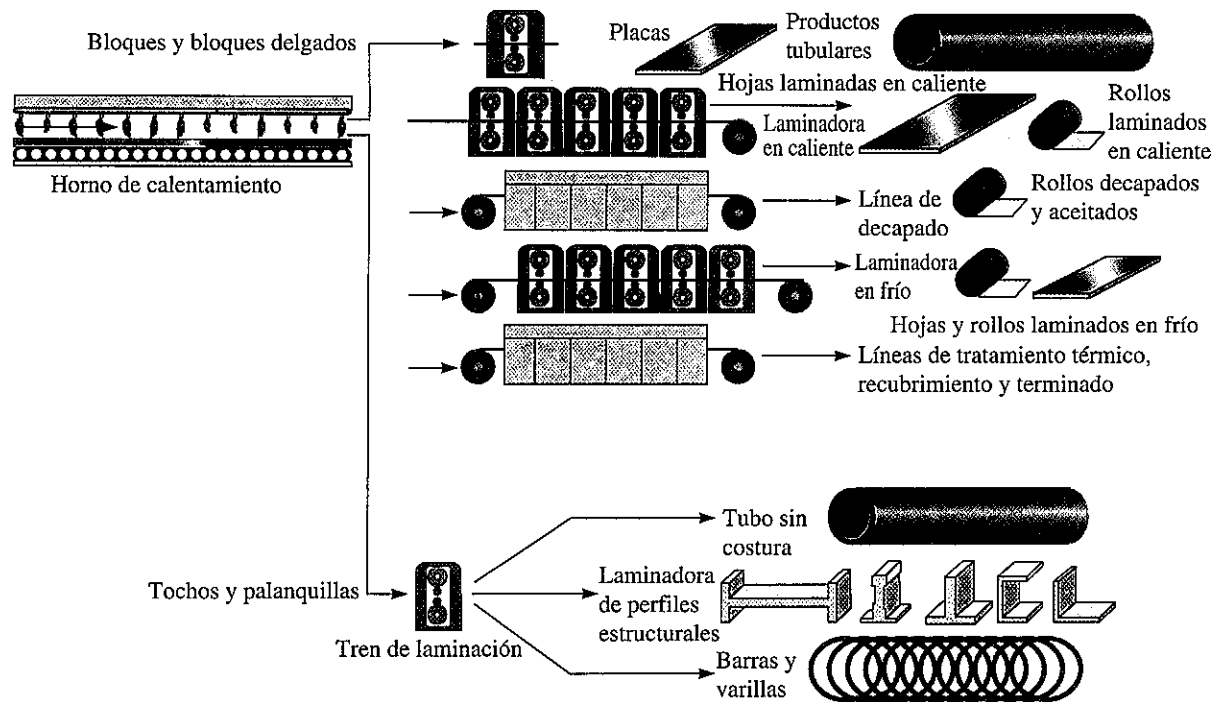


Figura 9-18 Etapas de procesamiento secundarias en el procesamiento de acero y aleaciones. (Fuente: www.steel.org. Utilizada con permiso del American Iron and Steel Institute.)

Ejemplo 9-8

Diseño de una máquina de colada continua

La figura 9-19 muestra un método para la colada continua de una placa de aluminio de 0.25 pulg de grosor y 48 pulg de ancho que después será laminada en hojas de aluminio. El aluminio líquido se introduce entre dos rodillos de acero grandes que giran con lentitud. Se desea que el aluminio sea solidificado por completo por los rodillos a medida que la placa emerge de la máquina. Los rodillos actúan como un molde permanente con una constante de molde B de alrededor de 5 min/pulg² cuando el aluminio se vierte con el sobrecalentamiento apropiado. Diseñe los rodillos requeridos para este proceso.

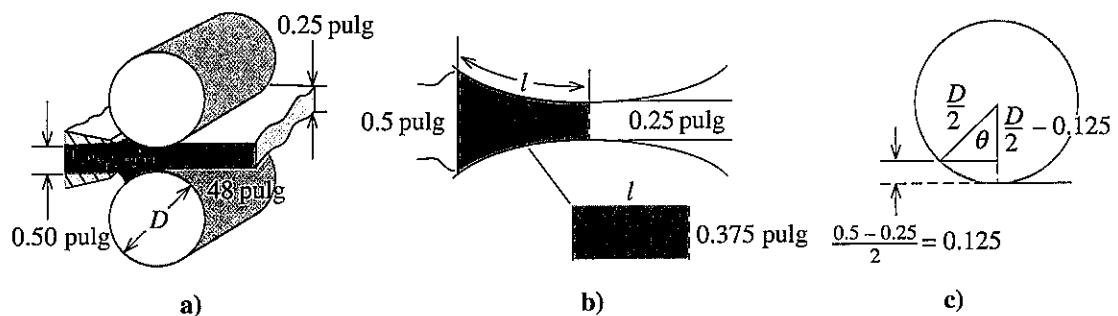


Figura 9-19 Colada continua horizontal del aluminio (para el ejemplo 9-8).

SOLUCIÓN

Sería útil simplificar la geometría de tal manera que se pueda determinar un tiempo de solidificación para el colado. Se supone que el área sombreada que se muestra en la figura 9-19b) representa la pieza y puede aproximarse mediante el grosor promedio por una longitud y un ancho. El grosor promedio es $(0.50 \text{ pulg} + 0.25 \text{ pulg})/2 = 0.375$. Entonces

$$V = (\text{grosor})(\text{longitud})(\text{ancho}) = 0.375lw$$

$$A = 2(\text{longitud})(\text{ancho}) = 2lw$$

$$\frac{V}{A} = \frac{0.375lw}{2lw} = 0.1875 \text{ pulg}$$

Sólo el área en contacto directo con los rodillos se utiliza en la regla de Chvorinov, dado que se transfiere poco o ningún calor desde las demás superficies. El tiempo de solidificación debe ser

$$t_s = B\left(\frac{V}{A}\right)^2 = (5)(0.1875)^2 = 0.1758 \text{ min}$$

Para que la placa permanezca en contacto con los rodillos por este tiempo, deben especificarse de manera apropiada el diámetro y la rapidez de rotación de los rodillos. La figura 9-19c) muestra que el ángulo θ entre los puntos donde el líquido entra y sale de los rodillos es

$$\cos \theta = \frac{(D/2) - 0.125}{(D/2)} = \frac{D - 0.25}{D}$$

La velocidad superficial de los rodillos es el producto de la circunferencia y la rapidez de rotación de los rodillos, $v = \pi DR$, donde R tiene unidades de revoluciones/minuto. La velocidad v también es la rapidez a la que se puede producir la placa de aluminio. El tiempo requerido para que los rodillos recorran la distancia l debe ser igual al tiempo de solidificación requerido:

$$t = \frac{l}{v} = 0.1758 \text{ min}$$

La longitud l es la fracción del diámetro de los rodillos que está en contacto con el aluminio durante su solidificación y está dada por

$$l = \frac{\pi D \theta}{360}$$

Observe que θ tiene unidades de grados. Entonces, sustituyendo l y v en la ecuación para el tiempo:

$$t = \frac{l}{v} = \frac{\pi D \theta}{360 \pi D R} = \frac{\theta}{360 R} = 0.1758 \text{ min}$$

$$R = \frac{\theta}{(360)(0.1758)} = .0158 \theta \text{ rev/min}$$

Varias combinaciones de D y R proveen la rapidez de solidificación requerida. Se calcula θ para varios diámetros y se encuentra la R requerida.

D (pulg)	θ (°)	I (pulg)	$R = 0.0159\theta$ (rev/min)	$v = \pi DR$ (pulg/min)
24	8.28	1.73	0.131	9.86
36	6.76	2.12	0.107	12.1
48	5.85	2.45	0.092	13.9
60	5.23	2.74	0.083	15.6

A medida que se incrementa el diámetro de los rodillos, el área de contacto (I) entre los rodillos y el metal aumenta. A su vez, esto permite una velocidad superficial (v) más rápida de los rodillos e incrementa la rapidez de producción de la placa. Observe que los rodillos con diámetro mayor no necesariamente giran muy rápido para lograr estas velocidades más altas.

En la selección del diseño final, se prefiere utilizar el diámetro práctico de los rodillos lo más grande posible para asegurar una rapidez de producción alta. Sin embargo, a medida que los rodillos se vuelven más grandes, éstos y su equipo de soporte se vuelven más costosos.

En la operación real de una colada continua, podrían utilizarse velocidades más rápidas, dado que las placas no tienen que solidificarse por completo en el punto donde emerge de los rodillos.

9-11 Solidificación direccional [SD], crecimiento de monocristales y crecimiento epitaxial

Existen algunas aplicaciones para las que no se desea una estructura de granos equiaxiales pequeños en una pieza colada. Las piezas coladas utilizadas para álabes y deflectores en motores de turbinas son un ejemplo (figura 9-20). Estas piezas coladas con frecuencia se hacen de superaleaciones basadas en titanio, cobalto o níquel empleando el vaciado por revestimiento de precisión.

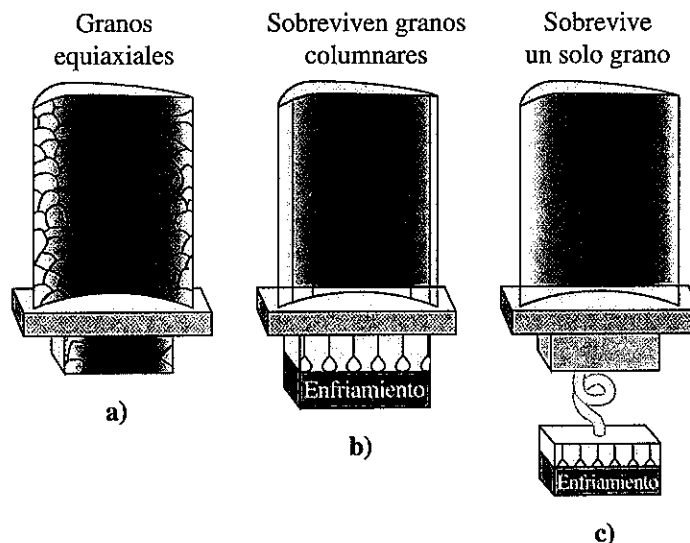


Figura 9-20 Control de la estructura de los granos en los álabes de turbinas: a) granos equiaxiales convencionales, b) granos columnares solidificados de manera direccional y c) monocristal.

En las piezas coladas de manera convencional con frecuencia se produce una estructura de granos equiaxiales. Sin embargo, los álabes y los deflectores para motores de turbinas y jets fallan a lo largo de los límites de granos transversales. Se obtiene una mejor resistencia a la termofluencia y a la fractura empleando la técnica de crecimiento de **solidificación direccional** (SD). En el proceso de SD, se calienta el molde desde un extremo y se enfría desde el otro, produciendo una microestructura columnar con todos los límites de los granos moviéndose en la dirección longitudinal de la pieza. En la dirección transversal no se presentan límites de grano [figura 9-20b)].

Se obtienen propiedades aún mejores empleando una técnica de *monocristal* (MC). La solidificación de los granos columnares comienza de nuevo en una superficie fría; sin embargo, debido a la cavidad helicoidal en el molde entre el disipador de calor y la cavidad principal del molde, sólo un grano columnar es capaz de crecer el cuerpo principal de la pieza colada [figura 9-20c)]. La pieza colada monocristalina no tiene límites de grano, por lo que sus planos y direcciones cristalográficas pueden dirigirse en una orientación óptima.

Crecimiento de monocristales Una de las aplicaciones más importantes de la solidificación es el crecimiento de monocristales. Los materiales policristalinos no pueden utilizarse de manera efectiva en muchas aplicaciones electrónicas y ópticas. Los límites de los granos y otros defectos interfieren con los mecanismos que proveen funciones eléctricas u ópticas útiles. Por ejemplo, para utilizar el comportamiento semiconductor del silicio dopado, deben utilizarse monocristales de alta pureza. La tecnología actual para el silicio usa monocristales grandes (de hasta 12 pulg de diámetro). Por lo regular se hace crecer un cristal grande del material [figura 9-21a)]. El cristal grande se corta en obleas de silicio que son de sólo unos cuantos milímetros de grosor [figura 9-21b)]. Los *procesos de Bridgman* y *Czochralski* son algunos de los métodos populares empleados para el crecimiento de monocristales de silicio, GaAs, niobato de litio (LiNbO_3) y muchos otros materiales.

Los hornos de crecimiento de cristales que contienen materiales fundidos deben mantenerse a una temperatura precisa y estable. Con frecuencia, se utiliza como una “semilla” un cristal pequeño de una orientación cristalográfica predeterminada. La transferencia de calor es controlada de tal manera que toda la fusión se cristaliza y forma un monocristal. Por lo regular los monocristales ofrecen propiedades considerablemente mejoradas, contro-

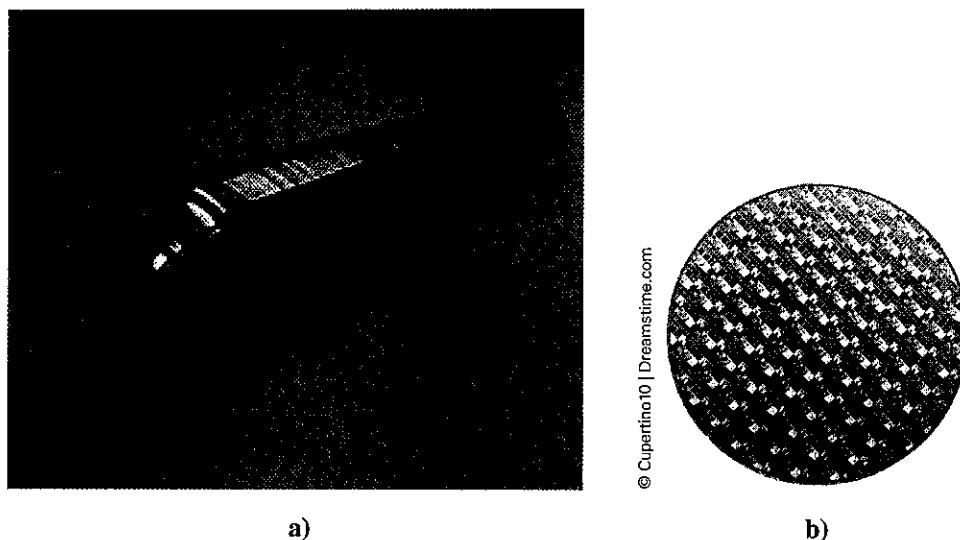


Figura 9-21 a) Monocristal de silicio (Cortesía de los doctores A. J. Deardo, M. Hua y J. García) y b) oblea de silicio.

lables y predecibles a un costo mayor al de los materiales policristalinos. Sin embargo, con una gran demanda el costo de los monocristales puede no ser un factor significativo para el resto de los costos del procesamiento involucrados en la fabricación de dispositivos nuevos y útiles.

Crecimiento epitaxial Probablemente existe más de un centenar de procesos para la deposición de materiales de películas finas. En algunos de estos procesos, existe una necesidad de controlar la textura u orientación cristalográfica del material policristalino que se está depositando; otros requieren una película monocristalina orientada en una dirección en particular. Si éste es el caso, se puede usar un sustrato de una orientación conocida. La epitaxia es el proceso por medio del cual se hace que un material crezca de una forma orientada utilizando un sustrato que coincida de manera cristalográfica con el material que se está haciendo crecer. Si la coincidencia de red entre el sustrato y la película es buena (dentro de una diferencia porcentual pequeña), es posible hacer crecer películas delgadas altamente orientadas o monocristalinas. A esto se le conoce como **crecimiento epitaxial**.

9-12 Solidificación de polímeros y vidrios inorgánicos

Muchos polímeros no se cristalizan, sino que se solidifican, cuando se enfrían. En estos materiales, puede existir la fuerza motriz termodinámica para la cristalización; sin embargo, la rapidez de formación de núcleos del sólido puede ser muy lenta o la complejidad de las cadenas de polímero puede ser tan grande que no se forma un sólido cristalino. La cristalización en los polímeros casi nunca se completa y es significativamente distinta de la de los materiales metálicos, requiriendo que las cadenas de polímero grandes se alineen de manera estrecha en distancias relativamente grandes. Al hacer esto, el polímero crece en forma de cristales **laminares**, o parecidos a placas (figura 9-22). La región entre cada laminilla contiene cadenas de polímero arregladas de manera amorfa. Además, los conjuntos de laminillas crecen a partir de un núcleo común, pero la orientación cristalográfica de las laminillas dentro de un conjunto es distinta de la de otro conjunto. A medida que los conjuntos crecen, pueden producir una forma esférica llamada **esferulita**. La esferulita está compuesta por muchos conjuntos indivi-

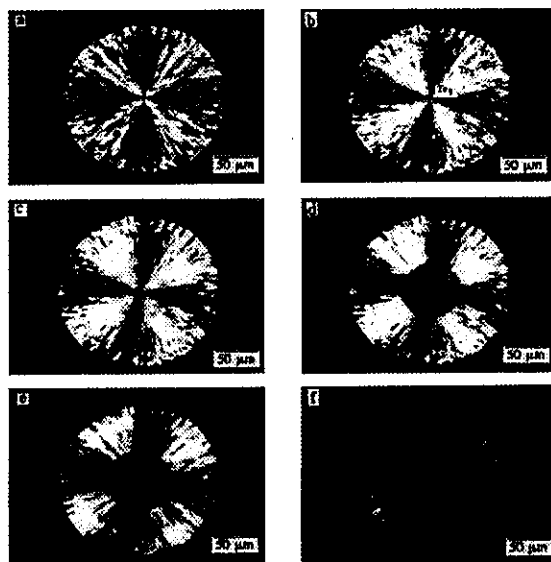


Figura 9-22
Una esferulita en el poliestireno a diferentes temperaturas. (Imagen cortesía de Crucible Compaction Metals).

duales de laminillas orientados de manera distinta. Se presentan regiones amorfas entre las laminillas individuales, los conjuntos de laminillas y las esferulitas individuales.

Muchos polímeros de interés comercial desarrollan cristalinidad durante su procesamiento. La cristalinidad puede originarse a partir del enfriamiento como se explicó anteriormente o a partir de la aplicación de un esfuerzo. Por ejemplo, se ha aprendido cómo las botellas de plástico PET se preparan empleando el proceso de soplado-estiramiento (capítulo 3) y cómo pueden desarrollar una cristalinidad considerable durante su formación. Esta cristalización es resultado de la aplicación de un esfuerzo y, por tanto, es diferente de la encontrada en la solidificación de metales y aleaciones. En general, los polímeros como el nailon y el polietileno se cristalizan con más facilidad en comparación con muchos otros termoplásticos.

Los vidrios inorgánicos, como los vidrios de silicato, tampoco se cristalizan con facilidad por razones cinéticas. Mientras exista la fuerza motriz termodinámica, de manera similar a la solidificación de metales y aleaciones, las fundiciones con frecuencia son muy viscosas y la difusión es demasiado lenta para que proceda la cristalización durante la solidificación. El proceso de vidrio flotado se emplea para fundir y colar piezas planas y grandes de vidrio. En este proceso se hace que el vidrio fundido flote sobre estaño fundido. Como se explicó en el capítulo 7, dado que la resistencia de los vidrios inorgánicos depende de manera crítica de las imperfecciones superficiales producidas por el proceso de fabricación o por la reacción con la humedad atmosférica, la mayoría de los vidrios se fortalece por medio del templado. Cuando la seguridad no es una preocupación primaria, se utiliza el recocido para reducir esfuerzos. Se producen grandes longitudes de fibras de vidrio, como las utilizadas en las fibras ópticas, fundiendo una barra de vidrio de pureza alta conocida como **preforma**. Como se mencionó antes, el control cuidadoso de la formación de núcleos en los vidrios puede conducir a vidrios-cerámicos, vidrios de colores y vidrios fotocromáticos (vidrios que pueden cambiar su color o polarizarse al exponerse a la luz del sol).

9-13 Unión de materiales metálicos

En la **soldadura fuerte**, se utiliza una aleación, conocida como relleno, para unir un metal a sí mismo o a otro metal. El metal de relleno de la soldadura fuerte tiene una temperatura de fusión por encima de alrededor de 450 °C. La **soldadura blanda** es un proceso de soldadura fuerte en el que el relleno tiene una temperatura de fusión por debajo de los 450 °C. Las aleaciones de plomo-estaño y antimonio-estaño son los materiales más comunes utilizados para la soldadura blanda. En la actualidad, existe una necesidad de crear materiales para soldadura blanda libres de plomo, debido a la toxicidad de éste. Se están desarrollando aleaciones que incluyen las basadas en Sn-Cu-Ag. En la soldadura fuerte y en la soldadura blanda, los materiales que se están uniendo no se funden; sólo se funde el material de relleno. Para la soldadura fuerte y la soldadura blanda, la composición del material de relleno es diferente de la del material base que se está uniendo. Para la soldadura fuerte se utilizan varios metales de aluminio-silicio, cobre, magnesio y preciosos.

La solidificación también es importante en la unión de metales a través de la **soldadura por fusión**. En los procesos de soldadura por fusión se funde una porción de los metales que van a unirse y, en algunos casos, se adiciona un metal fundido de relleno adicional. Al estanque de metal líquido se le llama **zona de fusión** (figuras 9-23 y 9-24). Cuando la zona de fusión se solidifica de manera subsecuente, las piezas originales de metal se unen entre sí. Durante la solidificación de la zona de fusión, no se requiere formación de núcleos. El sólido simplemente comienza a crecer a partir de los granos existentes, con frecuencia de una manera columnar.

La estructura y las propiedades de la zona de fusión dependen de muchas de las mismas variables que en una pieza colada metálica. La adición de agentes inoculantes a la zona de fusión reduce el tamaño de los granos. Las rapidezces de enfriamiento altas o los tiempos

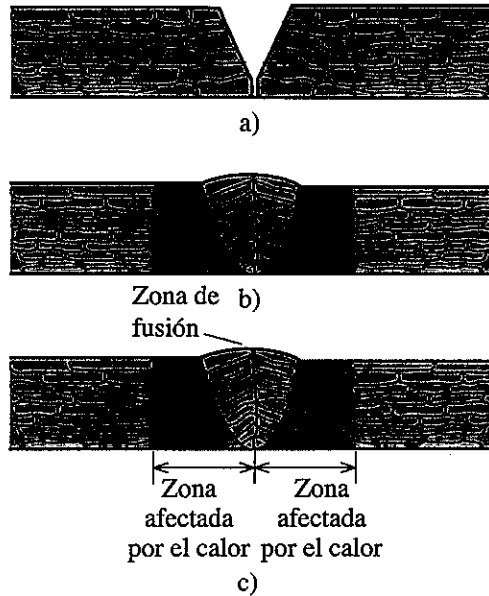


Figura 9-23
Diagrama esquemático de la zona de fusión y la solidificación de la soldadura durante la soldadura por fusión: a) unión preparada inicialmente, b) soldadura a la temperatura máxima, con la unión rellena con el metal de relleno y c) soldadura después de la solidificación.

de solidificación cortos promueven una microestructura más fina y propiedades mejoradas. Los factores que incrementan la rapidez de enfriamiento incluyen el incremento del grosor del metal, zonas de fusión más pequeñas, temperaturas del metal original bajas y ciertos tipos de procesos de soldadura. Por ejemplo, la soldadura con oxiacetileno utiliza una fuente de calor con una intensidad relativamente baja: en consecuencia, los tiempos de soldadura son largos y el metal sólido circundante, el cual se vuelve muy caliente, no es un dissipador de calor efectivo. Los procesos de soldadura por arco proveen una fuente de calor más intensa, por tanto reducen el calentamiento del metal circundante y proveen un enfriamiento más rápido. La soldadura con láser y la soldadura con haz de electrones son fuentes de calor excepcionalmente intensas y producen rapidez de enfriamiento muy altas y soldaduras potencialmente resistentes. Se ha desarrollado el proceso de soldadura de agitación con fricción para aleaciones de Al y Al-Li para aplicaciones aeroespaciales.

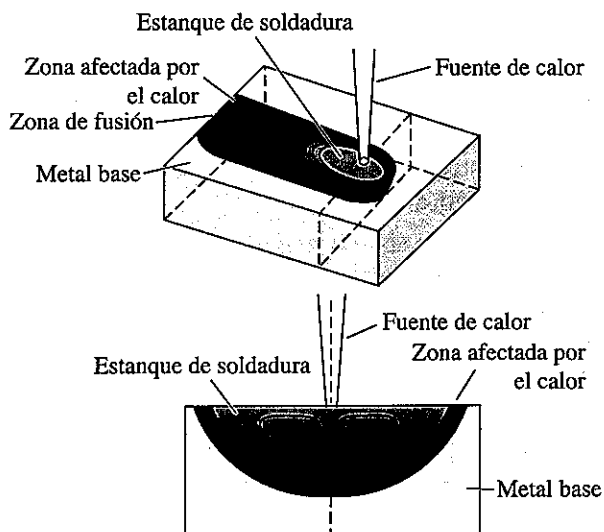


Figura 9-24
Diagrama esquemático que muestra la interacción entre la fuente de calor y el metal base. Las tres regiones distintas en la soldadura son la zona de fusión, la zona afectada por el calor y el metal base. (Reimpresa con permiso de "Current Issues and Problems in Welding Science", por S. A. David y T. DebRoy, 1992, Science, 257, pp. 497-502, fig. 2. Copyright © 1992 American Association for the Advancement of Science.)

Resumen

- La transformación de un líquido a un sólido es probablemente la transformación de fase más importante en las aplicaciones de la ciencia e ingeniería de materiales.
- La solidificación desempeña una función crítica en el procesamiento de metales, aleaciones, termoplásticos y vidrios inorgánicos. La solidificación también es importante en las técnicas utilizadas para la unión de materiales metálicos.
- La formación de núcleos o nucleación produce una partícula sólida de tamaño crítico a partir de la fusión líquida. La formación de núcleos está determinada por la fuerza motriz termodinámica para la solidificación y a ella se opone la necesidad de crear una interfaz sólido-líquido. Como resultado, la solidificación puede no ocurrir a la temperatura de solidificación.
- La nucleación homogénea requiere subenfriamientos grandes del líquido y no se observa en el procesamiento de solidificación normal. Al introducir partículas extrañas en el líquido, se proveen núcleos para la nucleación heterogénea. Esto se realiza en la práctica por medio de la inoculación o refinamiento de los granos. Este proceso permite el control del tamaño de los granos de la pieza colada.
- El enfriamiento rápido del líquido puede prevenir la formación de núcleos y el crecimiento, produciendo sólidos, o vidrios, amorfos con propiedades mecánicas y físicas inusuales. Los materiales poliméricos, metálicos e inorgánicos pueden fabricarse en forma de vidrios amorfos.
- En la solidificación a partir de fusiones, los núcleos crecen en la fusión líquida. Pueden observarse modos de crecimiento planares o dendríticos. En el crecimiento planar crece una interfaz sólido-líquido lisa con poco o ningún subenfriamiento del líquido. Los procesos de solidificación direccional especial aprovechan el crecimiento planar. El crecimiento dendrítico ocurre cuando el líquido se subenfía. El enfriamiento rápido, o un tiempo de solidificación corto, produce una estructura dendrítica más fina y con frecuencia conduce a la mejora de las propiedades mecánicas de una pieza colada metálica.
- La regla de Chvorinov, $t_s = B(V/A)^n$, puede utilizarse para calcular el tiempo de solidificación de una pieza colada. Las piezas coladas metálicas que tienen un espaciado dendrítico menor y un tamaño de granos más fino tienen resistencias más altas.
- Las curvas de enfriamiento indican la temperatura de vertido, cualquier subenfriamiento y recalcancia y el tiempo para la solidificación.
- El control de la formación de núcleos y el crecimiento puede darle a una pieza colada una estructura de granos columnares, una estructura de granos equiaxiales o una mezcla de las dos. El comportamiento isotrópico es común de los granos equiaxiales, mientras que el comportamiento anisotrópico se encuentra en los granos columnares.
- La porosidad y la contracción por cavidades son los defectos principales que pueden presentarse en los productos colados. Si se presentan, pueden ocasionar que los productos colados fallen de manera catastrófica.
- En los métodos de procesamiento de solidificación comerciales, los defectos en una pieza colada (como la contracción por solidificación o la porosidad gaseosa) pueden controlarse por medio del diseño apropiado del sistema de colado y de la mazarota o por medio del tratamiento apropiado del metal líquido antes de su vertido.
- El vaciado en arena, el colado por revestimiento y el colado en matriz a presión son algunos de los procesos para el colado de componentes. El vaciado de lingotes y la colada continua se emplean en la producción y el reciclaje de metales y aleaciones.
- Los procesos de solidificación pueden controlarse de manera cuidadosa para producir materiales solidificados en forma direccional al igual que monocristales. Los procesos epitaxiales utilizan la coincidencia de la estructura cristalina entre el sustrato y el material que se está haciendo crecer y son útiles para la fabricación de dispositivos electrónicos y otros.

Glosario

Acero inoxidable Aleación resistente a la corrosión hecha de Fe-Cr-Ni-C.

Aleaciones de formación de corteza Aleaciones cuya microestructura muestra una corteza externa de granos pequeños en la zona de enfriamiento seguida por dendritas.

Aleaciones de formación de pasta Aleaciones con una macroestructura fundida que consiste de manera predominante en granos equiaxiales. Se les conoce así dado que el material fundido se parece a una pasta de granos sólidos que flota en una fusión líquida.

Calor específico Calor requerido para cambiar la temperatura de una unidad de peso del material en un grado.

Calor latente de fusión (ΔH_f) Calor liberado cuando se solidifica un líquido. El calor latente de fusión está relacionado con la diferencia en energía entre el sólido y el líquido.

Cavidades Orificios pequeños presentes en una pieza colada.

Colada continua Proceso para convertir un metal o una aleación fundida en un producto semiterminado como un bloque.

Colado por revestimiento Proceso de fundición que se emplea para fabricar formas complejas como álabes de turbinas, también conocido como proceso a la cera perdida.

Constante del molde (B) Constante característica en la regla de Chvorinov.

Contracción Contracción de una pieza colada durante la solidificación.

Contracción interdendrítica Poros pequeños entre los brazos de dendritas formados por la contracción que acompaña la solidificación. También conocido como microcontracción o porosidad por contracción.

Contracción por cavidades Un vacío grande dentro de una pieza colada ocasionado por la contracción del volumen que ocurre durante la solidificación.

Contracción por rechupes Vacío grande de forma cónica en la superficie de una fundición ocasionada por la contracción del volumen que ocurre durante la solidificación.

Crecimiento Proceso físico por medio del cual una nueva fase aumenta de tamaño. En el caso de la solidificación, se refiere a la formación de un sólido estable a medida que el líquido se solidifica.

Crecimiento epitaxial Crecimiento de una película delgada monocristalina sobre un sustrato monocristalino que coincide de manera cristalográfica.

Crecimiento planar Crecimiento de una interfaz sólido-líquido lisa durante la solidificación cuando no se presenta subenfriamiento del líquido.

Dendrita Estructura parecida a un árbol del sólido que crece cuando se solidifica un líquido subenfriado.

Descarburación con oxígeno y argón (DOA) Proceso para refinar el acero inoxidable. El carbono disuelto en el acero inoxidable fundido es reducido al soplar gas argón mezclado con oxígeno.

Embrión Partícula del sólido que se forma a partir del líquido a medida que los átomos se aglomeran. El embrión puede crecer en un núcleo estable o volverse a disolver.

Endurecimiento por dispersión Incremento en la resistencia de un material metálico al generar una resistencia al movimiento de las dislocaciones por medio de la introducción de aglomerados pequeños de un segundo material. (También llamado endurecimiento de segunda fase.)

Esferulitas Cristales de forma esférica producidos cuando se solidifican ciertos polímeros.

Espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios (EBDS) Distancia entre los centros de dos brazos dendríticos secundarios adyacentes.

Estructura de lingote Macroestructura de una fundición, incluyendo la zona de enfriamiento, la zona columnar y la zona equiaxial.

Frente de solidificación Interfaz entre un sólido y un líquido.

Fundición en matriz a presión Proceso de fundición en el que se fuerza un metal fundido en una matriz bajo presión.

Fundición en molde permanente Proceso de fundición en el que se utiliza varias veces un molde.

Inoculación Adición de núcleos heterogéneos de manera controlada para incrementar el número de granos en una pieza colada.

Inoculantes Materiales que proveen sitios de nucleación heterogénea durante la solidificación de un material.

Interrupción térmica Meseta en la curva de enfriamiento durante la solidificación de un material ocasionada por la evolución del calor latente de fusión durante la solidificación. Esta generación de calor balancea el calor que se está perdiendo como resultado del enfriamiento.

Laminar Arreglo parecido a una placa de cristales dentro de un material.

Lavado con gas Proceso en el que se inyecta una corriente de gas en un metal fundido para eliminar un gas disuelto que podría producir porosidad.

Ley de Sievert La cantidad de un gas que se disuelve en un metal es proporcional a la raíz cuadrada de la presión parcial del gas en los alrededores.

Lingote Pieza colada simple que por lo regular se vuelve a fundir o a procesar por otro usuario para producir una forma más útil.

Mazarota Reserva adicional de metal líquido conectado a una pieza colada. Si después de la colada se solidifica la mazarota, ésta puede proveer metal líquido para compensar la contracción.

Microcontracción Poros pequeños con frecuencia aislados entre los brazos de dendritas formados por la contracción que acompaña la solidificación. También se le conoce como microcontracción o porosidad por contracción.

Nucleación Proceso físico por medio del cual se produce una nueva fase en un material. En el caso de la solidificación, se refiere a la formación de partículas sólidas pequeñas y estables en el líquido.

Nucleación heterogénea Formación de un sólido de tamaño crítico a partir del líquido en una superficie con impurezas.

Nucleación homogénea Formación de un sólido de tamaño crítico a partir de líquido por el aglomerado de un gran número de átomos a un subenfriamiento alto (sin una interfaz externa).

Núcleos Partículas pequeñas del sólido que se forman a partir del líquido a medida que los átomos se aglomeran. Debido a que estas partículas son lo suficientemente grandes para ser estables, puede comenzar el crecimiento del sólido.

Porosidad gaseosa Burbujas de gas atrapadas dentro de una pieza colada durante la solidificación, ocasionadas por la solubilidad menor del gas en el sólido en comparación con la del líquido.

Porosidad por contracción Poros pequeños entre los brazos de dendritas formados por la contracción que acompaña la solidificación. También se le conoce como microcontracción o porosidad interdendrítica.

Preforma Componente a partir del cual se estira una fibra o se fabrica una botella.

Procesamiento de solidificación rápida Producción de estructuras únicas de los materiales promoviendo rapidez de enfriamiento inusualmente altas durante la solidificación.

Procesamiento primario Proceso que involucra al colado de metales fundidos en lingotes o formas útiles semiterminadas como bloques.

Procesamiento secundario Proceso como el laminado, la extrusión, etc., empleados para procesar lingotes o bloques y otras formas semiterminadas.

Proceso a la cera perdida Proceso en el que se utiliza un patrón de cera para colar un metal.

Proceso a la espuma perdida Proceso en el que se utiliza una espuma de polímero como un patrón para producir una pieza colada.

Proceso de solidificación Procesamiento de materiales que involucra solidificación (por ejemplo, el crecimiento de monocristales, la colada continua, etcétera).

Radio crítico (r^*) Tamaño mínimo que debe ser formado por los átomos aglomerados en el líquido antes de que la partícula sólida sea estable y comience a crecer.

Refinación de granos Adición de núcleos heterogéneos de manera controlada para incrementar el número de granos en una pieza colada.

Regla de Chvorinov El tiempo de solidificación de una pieza colada es directamente proporcional al cuadrado de la razón volumen a área de superficie de la pieza colada.

Sobrecalentamiento Diferencia entre la temperatura del vertido y la temperatura de solidificación.

Soldadura La soldadura es un proceso de unión en que el material relleno o de aporte tiene una temperatura de fusión por debajo de los 450°C y no ocurre la fusión de los materiales base.

Soldadura fuerte Se utiliza una aleación, conocida como material relleno o de aporte, para unir dos materiales. La composición del relleno, el cual tiene una temperatura de fusión por encima de 450°C , es bastante distinta del metal que se está uniendo.

Soldadura por fusión Proceso de unión en el que debe fundirse una porción de los materiales para lograr una buena unión.

Solidificación direccional (SD) Técnica de solidificación en la que el enfriamiento en una dirección dada conduce al crecimiento preferencial de los granos en la dirección opuesta, conduciendo a una microestructura orientada y anisotrópica.

Subenfriamiento Temperatura a la que debe enfriarse el metal líquido por debajo de la temperatura de solidificación de equilibrio antes de que ocurra la formación de núcleos.

Tiempo de solidificación local Tiempo requerido para que una localización en particular en una pieza colada se solidifique una vez que ha comenzado la formación de núcleos.

Tiempo de solidificación total Tiempo requerido para que una pieza colada se solidifique por completo después de que se ha vertido.

Transformación de fase en estado sólido Cambio en fase que ocurre en el estado sólido.

Vaciado de lingotes Solidificación de un metal fundido en un molde de forma sencilla. El metal después requiere una deformación plástica extensiva para crear un producto terminado.

Vaciado en arena Proceso de fundición que utiliza moldes de arena.

Vidrio fotocromico Vidrio que cambia de color o de matiz al exponerse a la luz del sol.

Vidrios-cerámicos Materiales cerámicos policristalinos con granos ultrafinos obtenidos por medio de la cristalización controlada de vidrios amorfos.

Zona columnar Región de granos alargados que tienen una orientación preferida que se forma como resultado del crecimiento competitivo durante la solidificación de una pieza colada.

Zona de enfriamiento Región de granos pequeños orientados de manera aleatoria que se forma en la superficie de una pieza colada como resultado de la nucleación heterogénea.

Zona de fusión Porción de una soldadura calentada para producir sólo líquido durante el proceso de soldadura. La solidificación de la zona de fusión provee la unión.

Zona equiaxial Región de granos orientados de manera aleatoria en el centro de una pieza colada producida como resultado de la formación de núcleos extendida.

Problemas

Sección 9-1 Importancia tecnológica

- 9-1** Dé ejemplos de materiales basados en vidrios inorgánicos que se formen por solidificación.
- 9-2** ¿A qué se refieren los términos “procesamiento primario” y “secundario”?
- 9-3** ¿Por qué los materiales cerámicos no se preparan por medio de fusión y vaciado?

Sección 9-2 Formación de núcleos

- 9-4** Defina los siguientes términos: formación de núcleos (nucleación), embrión, formación de núcleos heterogénea y formación de núcleos homogénea.

9-5 ¿El agua se congela a 0°C y hierve a 100°C ? Explique su respuesta.

9-6 ¿El hielo se funde a 0°C ? Explique su respuesta.

9-7 Suponga que en vez de un núcleo esférico se tuviese un núcleo en forma de un cubo de longitud (x). Calcule la dimensión crítica x^* del cubo necesaria para la formación de núcleos. Escriba una ecuación similar a la ecuación 9-1 para un núcleo cúbico y deduzca una expresión para x^* similar a la ecuación 9-2.

9-8 ¿Por qué se requiere un subenfriamiento para la solidificación? Deduzca una ecuación que muestre el cambio en la energía libre total

como una función del subenfriamiento cuando el sólido que se está nucleando tiene un radio crítico del núcleo r^* .

9-9 ¿Por qué los núcleos vistos de manera experimental con frecuencia son esferoidales pero con facetas? ¿Por qué parecen esferas y no cubos u otras formas?

9-10 Explique el significado de cada término en la ecuación 9-2.

9-11 Suponga que se subenfria níquel líquido hasta que ocurre la nucleación homogénea. Calcule

- el radio crítico del núcleo requerido y
- el número de átomos de níquel en el núcleo.

Suponga que el parámetro de red del níquel CCCa sólido es de 0.356 nm.

9-12 Suponga que se subenfria hierro líquido hasta que ocurre la nucleación homogénea. Calcule

- el radio crítico del núcleo requerido y
- el número de átomos de hierro en el núcleo.

Suponga que el parámetro de red del hierro CCCu sólido es de 2.92 Å.

9-13 Suponga que el níquel sólido fue capaz de nuclearse de manera homogénea con un subenfriamiento de sólo 22 °C. ¿Cuántos átomos tendrían que agruparse de manera espontánea para que esto ocurra? Suponga que el parámetro de red del níquel CCCa sólido es de 0.356 nm.

9-14 Suponga que el hierro sólido fue capaz de nuclearse de manera homogénea con un subenfriamiento de sólo 15 °C. ¿Cuántos átomos tendrían que agruparse de manera espontánea para que esto ocurra? Suponga que el parámetro de red del hierro CCCu sólido es de 2.92 Å.

Sección 9-3 Aplicaciones de la nucleación controlada

9-15 Explique el término inoculación.

9-16 Explique cómo pueden endurecerse las aleaciones de aluminio utilizando niveles pequeños de adiciones de titanio y boro.

9-17 Compare y contraste los mecanismos del endurecimiento por tamaño de granos y del endurecimiento por deformación.

9-18 ¿Qué es un reforzamiento de segunda fase?

9-19 ¿Por qué muchas fusiones inorgánicas se solidifican en materiales amorfos con mayor facilidad en comparación con los materiales metálicos?

9-20 ¿Qué es un vidrio-cerámico? ¿Cómo se hacen los vidrios-cerámicos?

9-21 ¿Qué es un vidrio fotocromático?

9-22 ¿Qué es un vidrio metálico?

9-23 ¿Cómo forman nieve las máquinas en los lugares de temporada de esquí?

Sección 9-4 Mecanismos de crecimiento

9-24 ¿Cuáles son las dos etapas encontradas en la solidificación de metales fundidos? Como una función del tiempo, ¿pueden traslaparse entre sí?

9-25 Durante la solidificación se necesita eliminar el calor específico del material y el calor latente de fusión. Defina cada uno de estos términos.

9-26 Describa en qué condiciones se espera que los metales fundidos experimenten solidificación dendrítica.

9-27 Describa en qué condiciones se espera que los metales fundidos experimenten solidificación de frente plano.

9-28 Utilice la información en la tabla 9-1 y sobre el calor específico dada abajo para calcular el subenfriamiento requerido a fin de mantener la fracción dendrítica a 0.5 para cada metal.

Metal	Calor específico (J/(cm ³ ·K))
Bi	1.27
Pb	1.47
Cu	3.48
Ni	4.75

9-29 Calcule la fracción de solidificación que ocurre de manera dendrítica cuando la plata se nuclea

- a un subenfriamiento de 10 °C;
- a un subenfriamiento de 100 °C, y
- de manera homogénea.

El calor específico de la plata es de 3.25 J/(cm³·°C).

9-30 Calcule la fracción de solidificación que ocurre de manera dendrítica cuando el hierro se nuclea

- a un subenfriamiento de 10 °C;
- a un subenfriamiento de 100 °C, y
- de manera homogénea.

El calor específico del hierro es de 5.78 J/(cm³·°C).

9-31 El análisis de una pieza colada de níquel sugiere que 28% del proceso de solidificación ocurrió de manera dendrítica. Calcule la temperatura a la que ocurrió la formación de núcleos. El calor específico del níquel es de 4.1 J/(cm³·°C).

Sección 9-5 Tiempo de solidificación y tamaño dendrítico

9-32 Escriba la regla de Chvorinov y explique el significado de cada término.

9-33 Encuentre la constante del molde B y el exponente n en la regla de Chvorinov utilizando la siguiente información y una gráfica log-log:

Forma	Dimensiones (cm)	Tiempo de solidificación (s)
Cilindro	Radio = 10, Longitud = 30	5000
Esfera	Radio = 9	1800
Cubo	Longitud = 6	200
Placa	Longitud = 30, Ancho = 20, Altura = 1	40

9-34 Un cubo de 2 pulg se solidifica en 4.6 min. Suponga $n = 2$. Calcule

- la constante del molde en la regla de Chvorinov y
- el tiempo de solidificación para una barra de $0.5 \times 0.5 \times 6$ pulg colada en las mismas condiciones.

9-35 Una esfera de 5 cm de diámetro se solidifica en 1050 s. Calcule el tiempo de solidificación para una placa de $0.3 \times 10 \times 20$ cm colada en las mismas condiciones. Suponga que $n = 2$.

9-36 Encuentre las constantes B y n en la regla de Chvorinov graficando la siguiente información en una gráfica log-log:

Dimensiones de la pieza colada (min)	Tiempo de solidificación (pulg)
$0.5 \times 8 \times 12$	3.48
$2 \times 3 \times 10$	15.78
2.5 cubo	10.17
$1 \times 4 \times 9$	8.13

9-37 Encuentre las constantes B y n en la regla de Chvorinov graficando la siguiente información en una gráfica log-log:

Dimensiones de la pieza colada (cm)	Tiempo de solidificación (s)
$1 \times 1 \times 6$	28.58
$2 \times 4 \times 4$	98.30
$4 \times 4 \times 4$	155.89
$8 \times 6 \times 5$	306.15

9-38 Se produjo una pieza colada de 3 pulg de diámetro. Se midieron los tiempos requeridos para que la interfaz sólido-líquido alcanzara diferentes distancias debajo de la superficie de la pieza colada y se muestran en la siguiente tabla:

Distancia a la superficie (pulg)	Tiempo (s)
0.1	32.6
0.3	73.5
0.5	130.6
0.75	225.0
1.0	334.9

Determine

- el tiempo en el que comenzó la solidificación en la superficie y
- el tiempo en el que se espera que toda la pieza sea sólida.
- Suponga que el centro de la pieza en realidad se solidificó en 720 s. Explique por qué este tiempo podría diferir del tiempo calculado en el inciso b).

9-39 Una placa de aleación de aluminio con dimensiones de $20 \times 10 \times 2$ cm necesita colarse con un espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios de 10^{-2} cm (refiérase a la figura 9-6). ¿Qué constante del molde B se requiere (suponga que $n = 2$)?

9-40 La figura 9-5b) muestra una micrografía de una aleación de aluminio. Calcule

- el espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios y
- el tiempo de solidificación local para el área de la fundición.



Figura 9-5 (Repetida para el problema 9-40 b)) Dendritas en una aleación de aluminio (50 $\times$). (De ASM Handbook, vol. 9, Metallography and Microstructure (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.)

- 9-41** La figura 9-25 muestra una fotografía de las dendritas de FeO que se precipitaron de un vidrio de óxido (un líquido subenfriado). Calcule el espaciamiento de los brazos dendríticos secundarios.

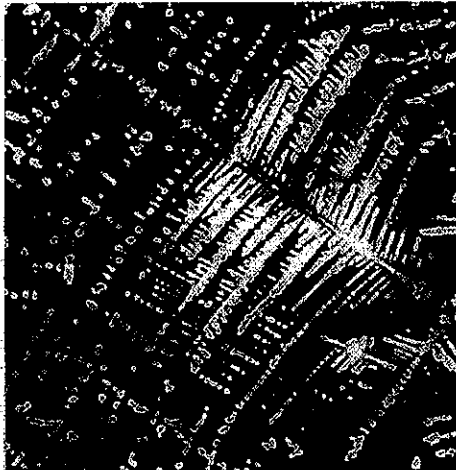


Figura 9-25 Micrografía de las dendritas de FeO en un vidrio de óxido (450×) (para el problema 9-41). (Cortesía de C. W. Ramsay, University of Missouri-Rolla.)

- 9-42** Encuentre las constantes k y m que relacionan el espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios con el tiempo de solidificación local graficando la siguiente información en una gráfica log-log:

Tiempo de solidificación (s)	EBDS (cm)
156	0.0176
282	0.0216
606	0.0282
1356	0.0374

- 9-43** La figura 9-26 muestra las dendritas en una partícula de polvo de titanio que se ha solidificado de manera rápida. Suponiendo que el tamaño de las dendritas de titanio está relacionado con el tiempo de solidificación por medio de la misma relación que en el aluminio, calcule el tiempo de solidificación de la partícula de polvo.



Figura 9-26 Dendritas en una partícula de polvo de titanio producidas por el procesamiento de solidificación rápida (2200×) (para el problema 9-43). (De J. D. Ayers y K. Moore, "Formation of Metal Carbide Powder by Spark Machining of Reactive Metals", en Metallurgical Transactions, vol. 15A, junio de 1984, p. 1120.)

- 9-44** El espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios en una soldadura de cobre con haz de electrones es de 9.5×10^{-4} cm. Calcule el tiempo de solidificación de la soldadura.

Sección 9-6 Curvas de enfriamiento

- 9-45** Trace una curva de enfriamiento para un metal puro y etiquete de manera cuidadosa las distintas regiones.
- 9-46** ¿A qué se refiere el término recalcancia?
- 9-47** ¿Qué es la interrupción térmica?
- 9-48** ¿A qué se refiere con los términos tiempos de "solidificación total" y "local"?
- 9-49** En la figura 9-27 se muestra una curva de enfriamiento.

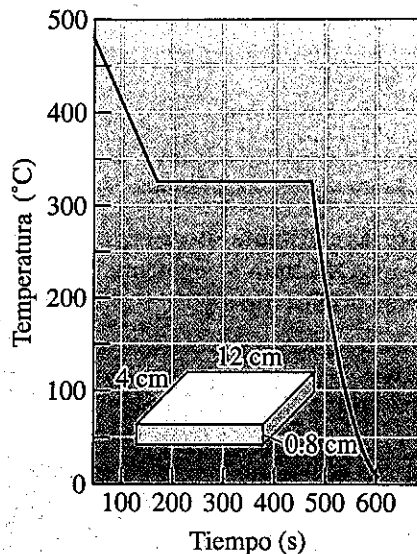


Figura 9-27 Curva de enfriamiento (para el problema 9-49).

Determine:

- la temperatura del vertido;
- la temperatura de solidificación;
- el sobrecalentamiento;
- la rapidez de enfriamiento, justo antes de que comience la solidificación;
- el tiempo de solidificación total;
- el tiempo de solidificación local, y
- la identidad probable del metal.
- Si la curva de enfriamiento se obtuvo en el centro de la pieza colada representado en la figura, determine la constante del molde, suponiendo que $n = 2$.

9-50 En la figura 9-28 se muestra una curva de enfriamiento.

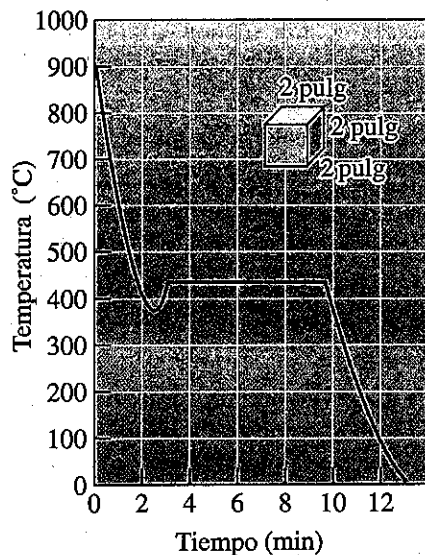


Figura 9-28 Curva de enfriamiento (para el problema 9-50).

Determine:

- la temperatura del vertido;
- la temperatura de solidificación;
- el sobrecalentamiento;
- la rapidez de enfriamiento, justo antes de que comience la solidificación;
- el tiempo de solidificación total;
- el tiempo de solidificación local;
- el subenfriamiento, y
- la identidad probable del metal.
- Si la curva de enfriamiento se obtuvo en el centro de la pieza colada representado en la figura, determine la constante del molde, suponiendo que $n = 2$.

9-51 La figura 9-29 muestra las curvas de enfriamiento obtenidas a partir de varias localizaciones dentro de una pieza colada cilíndrica de aluminio. Determine los tiempos de solidificación locales y el EBDS en cada

localización, después grafique la resistencia a la tensión en función a la distancia de la superficie de la pieza colada. ¿Recomendaría que se diseñe la pieza colada de tal manera que deba maquinarse una cantidad de material grande o pequeña de la superficie durante el acabado? Explique.

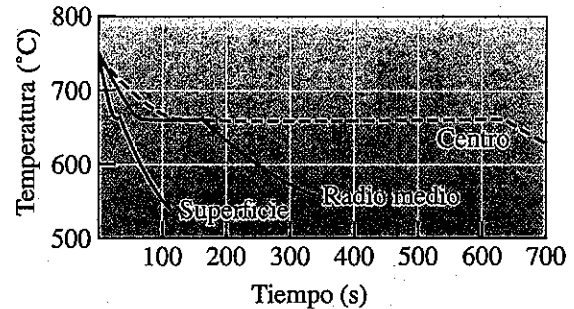


Figura 9-29 Curvas de enfriamiento (para el problema 9-51).

Sección 9-7 Estructura de la pieza colada

- 9-52** ¿Cuáles son las características esperadas en la macroestructura de un componente colado? Explique utilizando una representación.
- 9-53** En los materiales colados, ¿por qué la solidificación casi siempre comienza en las paredes del molde?
- 9-54** ¿Por qué los componentes forjados no muestran una estructura de lingote vaciado?

Sección 9-8 Defectos de solidificación

- 9-55** ¿Qué tipo de defecto en una pieza colada puede ocasionar la falla catastrófica de los componentes colados como los álabes de turbinas? ¿Qué precauciones se toman para prevenir la porosidad en las piezas coladas?
- 9-56** En general, en comparación con los componentes preparados empleando forjado, laminado, extrusión, etc., los productos colados tienden a tener una tenacidad a la fractura menor. Explique por qué puede ser éste el caso.
- 9-57** ¿Qué es una mazarota? ¿Por qué debe solidificarse después de la pieza colada?
- 9-58** Calcule el volumen, el diámetro y la altura de la mazarota cilíndrica requerida para prevenir la contracción en una pieza colada de $1 \times 6 \times 6$ pulg si la H/D de la mazarota es de 1.0.
- 9-59** Calcule el volumen, el diámetro y la altura de la mazarota cilíndrica requerida para prevenir la contracción en una pieza colada de $4 \times 10 \times 20$ pulg si la H/D de la mazarota es de 1.5.

- 9-60** La figura 9-30 muestra una mazarota cilíndrica unida a una pieza colada. Compare los tiempos de solidificación para cada sección de la pieza colada y la mazarota y determine si ésta será efectiva.

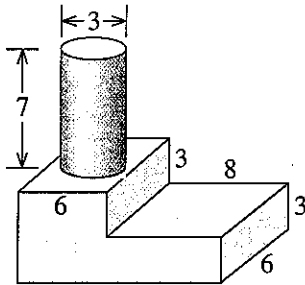


Figura 9-30 Pieza colada de bloque en escalón (para el problema 9-60).

- 9-61** La figura 9-31 muestra una mazarota cilíndrica unida a una pieza colada. Compare los tiempos de solidificación para cada sección de la pieza colada y la mazarota y determine si la mazarota será efectiva.

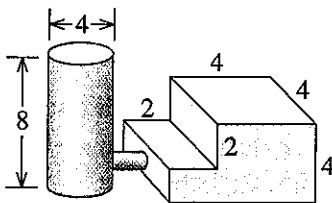


Figura 9-31 Pieza colada de bloque en escalón (para el problema 9-61).

- 9-62** Se permite que una esfera de cobre líquido de 4 pulg de diámetro se solidifique, produciendo una cavidad esférica por contracción en el centro de la pieza colada. Compare el volumen y el diámetro de la cavidad por contracción en la pieza colada de cobre con el obtenido cuando se permite que se solidifique una esfera de hierro líquido de 4 pulg.
- 9-63** Se permite que un cubo de un metal líquido de 4 pulg se solidifique. En la pieza colada sólida se observa una cavidad esférica por contracción con un diámetro de 1.49 pulg. Determine el porcentaje del cambio en volumen que ocurre durante la solidificación.

- 9-64** Se produce una pieza colada de magnesio de $2 \times 4 \times 6$ cm. Después de enfriarse a temperatura ambiente, se encuentra que la pieza colada pesa 80 g. Determine
- el volumen de la cavidad por contracción en el centro de la pieza colada y
 - el porcentaje de contracción que debe haber ocurrido durante la solidificación.
- 9-65** Se produce una pieza colada de hierro de $2 \times 8 \times 10$ pulg y, después de enfriarse a temperatura ambiente, se encuentra que pesa 43.9 lb. Determine
- el porcentaje de contracción que debe haber ocurrido durante la solidificación y
 - el número de poros por contracción en la pieza colada si toda la contracción ocurre como poros con un diámetro de 0.05 pulg.

- 9-66** Dé ejemplos de materiales que se expanden en la solidificación.

- 9-67** ¿Cómo puede eliminarse o minimizarse la porosidad gaseosa en las aleaciones fundidas?

- 9-68** En el contexto de la preparación del acero inoxidable, ¿qué es la descarburación con argón y oxígeno?

- 9-69** Se vierte magnesio líquido en un molde de $2 \times 2 \times 24$ cm y, como resultado de la solidificación direccional, toda la contracción por solidificación ocurre a lo largo de la longitud de la pieza colada de 24 cm. Determine la longitud de la pieza colada inmediatamente después de que se completa la solidificación.

- 9-70** Un hierro colado líquido tiene una densidad de 7.65 g/cm^3 . Inmediatamente después de la solidificación, la densidad del hierro colado sólido se determina que es 7.71 g/cm^3 . Determine el porcentaje del cambio en volumen que ocurre durante la solidificación. ¿El hierro colado se expande o se contrae durante la solidificación?

- 9-71** El cobre fundido a presión atmosférica contiene un % en peso de 0.01 de oxígeno. El cobre fundido se coloca en una cámara que se bombea a 1 Pa para eliminar el gas de la fundición antes de verterlo en el molde. Calcule el contenido de oxígeno del fundido de cobre después de que se sujeta al tratamiento de desgasificación.

- 9-72** A partir de la figura 9-14, encuentre la solubilidad del hidrógeno en el aluminio líquido antes de que comience la solidificación cuan-

do la presión parcial del hidrógeno es de 1 atm. Determine la solubilidad del hidrógeno (en $\text{cm}^3/100 \text{ g de Al}$) a la misma temperatura si la presión parcial se redujera a 0.01 atm.

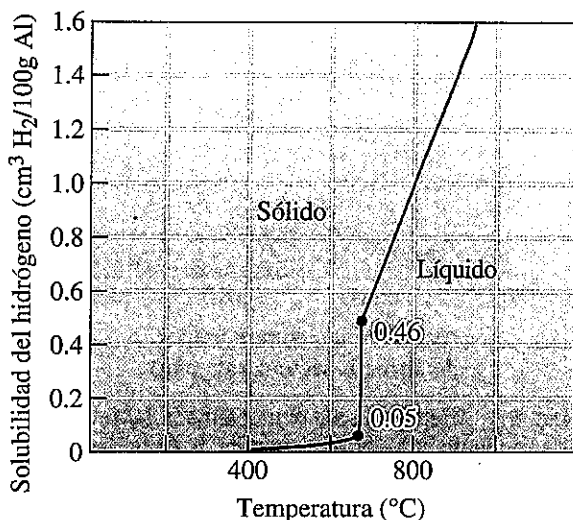


Figura 9-14 (Repetida para el problema 9-72). Solubilidad del gas hidrógeno en aluminio cuando la presión parcial del $\text{H}_2 = 1 \text{ atm}$.

- 9-73** La solubilidad del hidrógeno en aluminio líquido a 715°C se determina que es de $1 \text{ cm}^3/100 \text{ g de Al}$. Si todo este hidrógeno se precipita como burbujas de gas durante la solidificación y permanece atrapado en la fundición, calcule el porcentaje en volumen del gas en el aluminio sólido.

Sección 9-9 Procesos de vaciado para la fabricación de componentes

- 9-74** Explique el proceso de moldeo en arena verde.
- 9-75** ¿Por qué las piezas coladas hechas a partir de colado en matriz a presión son probablemente más resistentes que las que se hacen utilizando el proceso de vaciado en arena?
- 9-76** Una aleación se vacía en una forma utilizando un molde de arena y un molde metálico. ¿Qué pieza colada se espera que sea más resistente y por qué?
- 9-77** ¿Qué es vaciado por revestimiento? ¿Cuáles son las ventajas del vaciado por revestimiento? Explique por qué este proceso se utiliza con frecuencia para colar álabes de turbinas.
- 9-78** ¿Por qué la presión es un componente clave en el proceso de colado en matriz a presión?

Sección 9-10 Colada continua y vaciado de lingotes

- 9-79** ¿Qué es un mineral?
- 9-80** Explique de manera breve cómo se fabrica un acero, comenzando con el mineral de hierro, el coque y la piedra caliza.
- 9-81** Explique cómo se utiliza la chatarra para preparar aleaciones.
- 9-82** ¿Qué es un lingote?
- 9-83** ¿Por qué ha asumido cada vez más importancia la colada continua de aceros y otras aleaciones?
- 9-84** ¿Cuáles son algunas de las etapas que siguen al proceso de colada continua?

Sección 9-11 Solidificación direccional (SD), crecimiento de monocristales y crecimiento epitaxial

- 9-85** Defina el término solidificación direccional.
- 9-86** Explique la función de la formación de núcleos y crecimiento en el crecimiento de monocristales.

Sección 9-12 Solidificación de polímeros y vidrios inorgánicos

- 9-87** ¿Por qué la mayoría de los plásticos contienen regiones amorfas y cristalinas?
- 9-88** ¿Qué es una esferulita?
- 9-89** ¿Cómo el procesamiento puede influir en la cristalinidad de los polímeros?
- 9-90** Explique por qué los vidrios de silicato tienden a formar vidrios amorfos; sin embargo, las fundiciones metálicas por lo regular se cristalizan con facilidad.

Sección 9-13 Unión de materiales metálicos

- 9-91** Defina los términos soldadura fuerte y soldadura blanda.
- 9-92** ¿Cuál es la diferencia entre soldadura por fusión, soldadura fuerte y soldadura blanda?
- 9-93** ¿Qué es la zona afectada por el calor?
- 9-94** Explique por qué, cuando se utilizan fuentes de calor de baja intensidad, la resistencia del material en una región soldada puede reducirse.
- 9-95** ¿Por qué los procesos de soldadura con láser y haz de electrones conducen a soldaduras más resistentes?



Problemas de diseño

- 9-96** El aluminio se funde en condiciones que dan 0.06 cm^3 de H_2 por 100 g de aluminio. Se

ha encontrado que se debe tener no más de 0.002 cm^3 de H_2 por 100 g de aluminio para prevenir la formación de burbujas de gas hidrógeno durante la solidificación. Diseñe un proceso de tratamiento para el aluminio líquido que asegure que no se forme la porosidad por hidrógeno.

- 9-97** Cuando se unen dos placas de cobre de 0.5 pulg de grosor empleando un proceso de soldadura con arco, la zona de fusión contiene dendritas que tienen un EBDS de 0.006 cm ; sin embargo, este proceso produce esfuerzos residuales grandes en la soldadura. Se ha encontrado que los esfuerzos residuales son bajos cuando las condiciones de soldadura producen un EBDS de más de 0.02 cm . Diseñe un proceso por medio del cual se puedan lograr esfuerzos residuales bajos. Justifique su diseño.

- 9-98** Diseñe un sistema eficiente de mazarota para la pieza mostrada en la figura 9-32. Asegúrese de incluir una representación del sistema, junto con las dimensiones apropiadas.

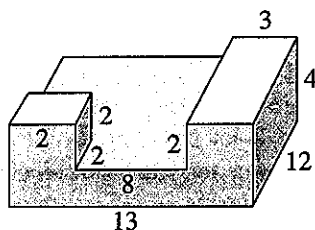


Figura 9-32 Pieza que va utilizar mazarota (para el problema 9-98).

- 9-99** Diseñe un proceso que produzca una pieza colada de acero que tenga propiedades uniformes y una resistencia alta. Asegúrese de incluir las características de la microestructura que desee controlar y explique cómo lo haría.
- 9-100** Se va a inyectar aluminio fundido en un molde de acero bajo presión (fundición en molde). La pieza es en esencia un cilindro de 12 pulg de largo y de 2 pulg de diámetro con un grosor de pared uniforme y debe tener una resistencia a la tensión mínima de 40 000 psi. Con base en las propiedades dadas en la figura 9-7, diseñe la pieza y el proceso.

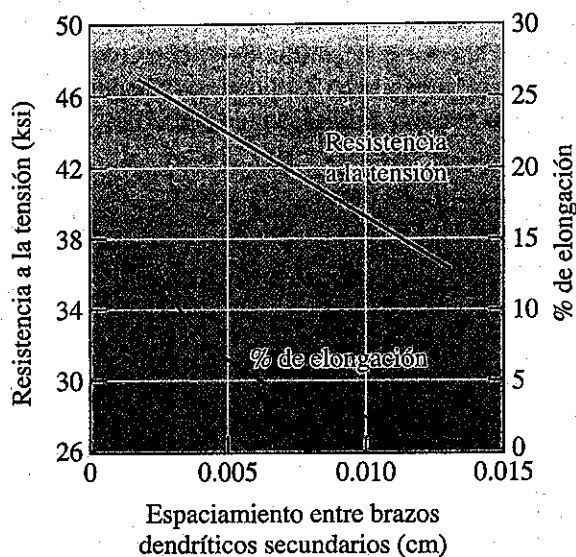


Figura 9-7 (Repetida para el problema 9-100) Efecto del espaciado entre brazos dendríticos secundarios sobre las propiedades de una aleación colada de aluminio.

Problemas de cómputo

- 9-101** *Radio crítico para la nucleación homogénea.* Escriba un programa de cómputo que permitirá el cálculo del radio crítico para la formación de núcleos (r^*). El programa debe pedirle al usuario que provea los valores de σ_{sl} , T_f , subenfriamiento (ΔT) y la entalpía de fusión (ΔH_f). Por favor asegúrese de las peticiones sean correctas en el programa para tener los valores de entrada en las unidades correctas.
- 9-102** *Energía libre para la formación del núcleo de tamaño crítico por medio de la nucleación heterogénea.* Cuando la formación de núcleos ocurre de manera heterogénea, la energía libre para un núcleo de un tamaño crítico ($\Delta G^*_{\text{hetero}}$) está dada por

$$\Delta G^*_{\text{hetero}} = \Delta G^*_{\text{homo}} f(\theta), \text{ donde}$$

$$f(\theta) = \frac{(2 + \cos \theta)(1 - \cos \theta)^2}{4}$$

$$\text{y } \Delta G^*_{\text{homo}} \text{ está dada por } \frac{16\pi\sigma_{sl}^3}{3\Delta G_v^2},$$

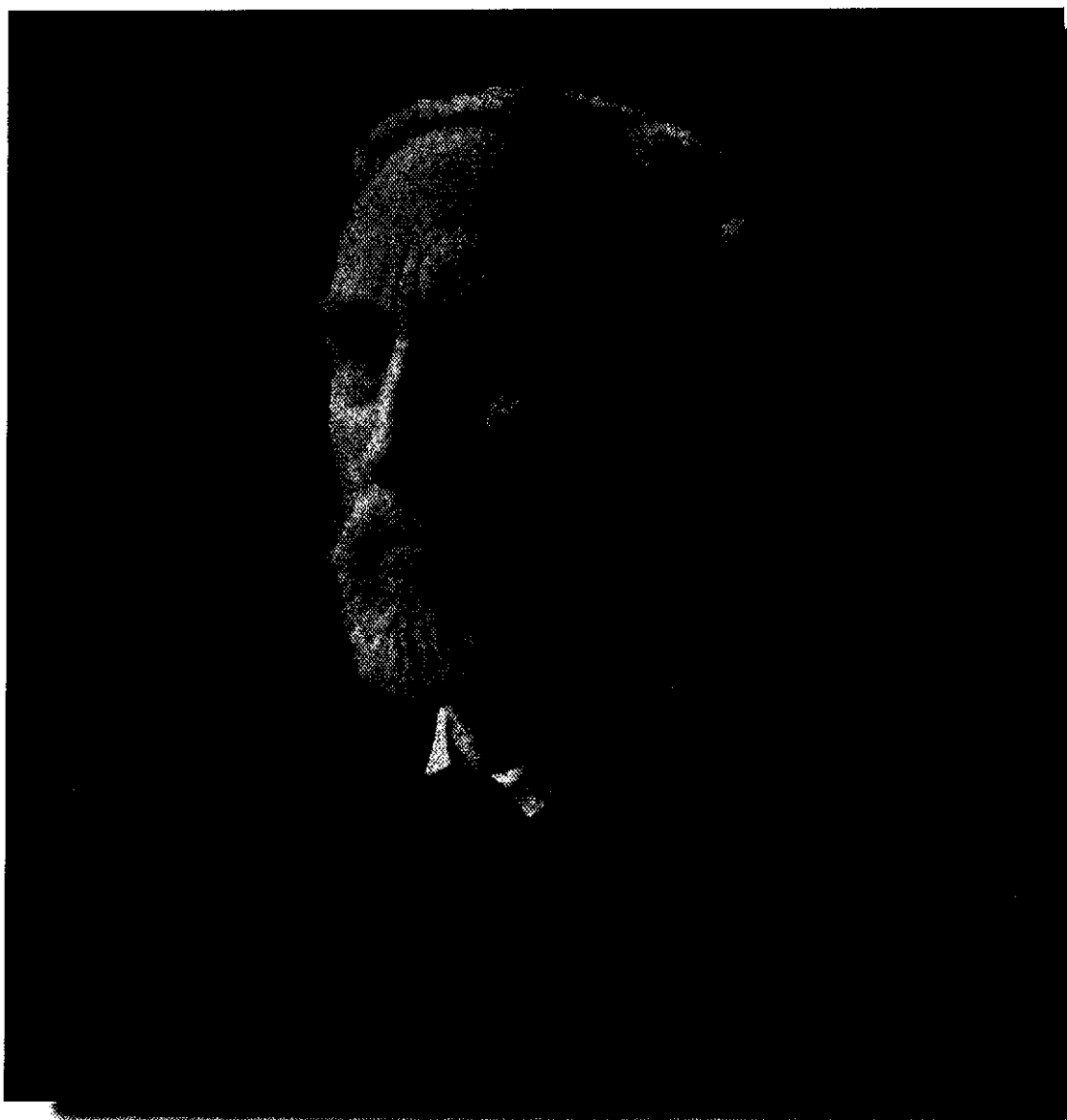
la cual es la energía libre para la nucleación homogénea de un núcleo de tamaño crítico. Si el ángulo de contacto (θ) de la fase que se está nucleando en la superficie preexistente

es de 180° , no hay humectación y el valor de la función $f(\theta)$ es 1. La energía libre de la formación de un núcleo de un radio crítico es la misma que para la nucleación homogénea. Si la fase de formación de núcleos humedece al sólido por completo (es decir, $\theta = 0$), entonces $f(\theta) = 0$ y no hay barrera para la nucleación. Escriba un programa de cómputo que le pida al usuario que provea los valores de los parámetros necesarios a fin de calcular la energía libre para la formación de un núcleo por medio de la nucleación homogénea. El programa debe calcular el valor de ΔG^{hetero} como una función del ángulo de contacto (θ) de 0 a 180° . Examine la variación de los valores de la energía libre como una función del ángulo de contacto.

- 9-103** *Regla de Chvorinov.* Escriba un programa de cómputo que calcule el tiempo de solidificación para una pieza colada. El programa debe pedirle al usuario que introduzca el volumen de la pieza colada y el área de superficie a partir de la cual ocurrirá la transferencia de calor y la constante del molde. El programa debe utilizar la regla de Chvorinov para calcular el tiempo de solidificación.

Knovel® Problemas

- K9-1** ¿Qué es el hierro blanco enfriado y para qué se utiliza?
- K9-2** ¿Qué tipos de defectos pueden existir en el hierro blanco enfriado?



Josiah Willard Gibbs (1839-1903) fue un físico y matemático estadounidense brillante que condujo algunos de los trabajos pioneros más importantes relacionados con el equilibrio termodinámico. *(Cortesía de la University of Pennsylvania Library.)*

Soluciones sólidas y equilibrio de fases

¿Se ha preguntado alguna vez?

- ¿Es posible que las formas sólida, líquida y gaseosa de un material coexistan?
- ¿Qué material se utiliza para fabricar los diodos emisores de luz roja utilizados en muchas pantallas de productos modernos?
- Cuando una aleación como el latón se solidifica, ¿cuál elemento se solidifica primero: el cobre o el zinc?

Se ha visto que la resistencia de los materiales metálicos puede mejorarse utilizando

- a) el endurecimiento por tamaño de los granos (ecuación de Hall-Petch);
- b) el trabajo en frío o endurecimiento por deformación;
- c) la formación de partículas pequeñas de segundas fases, y
- d) adiciones de cantidades pequeñas de elementos.

Cuando se adicionan cantidades pequeñas de elementos, puede formarse un material sólido conocido como solución sólida. Una **solución sólida** contiene dos o más tipos de átomos o iones que se dispersan de manera uniforme a lo largo del material. La impureza o átomos del **soluto** pueden ocupar los sitios de redes regulares en el cristal o los sitios intersticiales. Al controlar la cantidad de estos defectos de punto (puntuales) por medio de la composición, se pueden manipular las propiedades mecánicas y otras de las soluciones sólidas. Por ejemplo, en los materiales metálicos, los defectos de punto creados por la impureza o átomos de soluto perturban el arreglo atómico en el material cristalino e interfieren con el movimiento de las dislocaciones. Los defectos de punto ocasionan que el material se endurezca por solución sólida.

La introducción de elementos de aleación o impurezas durante el procesamiento modifica la composición del material e influye en su comportamiento de solidificación. En este capítulo, se examinará este efecto introduciendo el concepto del diagrama de equilibrio de fases. Por ahora, se considera una "fase" como una forma única en la que un material existe.

Más adelante en este capítulo se definirá de manera más precisa el término "fase." Un diagrama de fases indica la estabilidad de las distintas fases para un conjunto de elementos (por ejemplo, Al y Si). A partir del diagrama de fases, se puede predecir cómo se solidificará un material en condiciones de equilibrio. También puede predecir qué fases se esperará que sean estables de manera termodinámica y en qué concentraciones deben estar presentes.

Por tanto, los objetivos principales de este capítulo son explorar

1. la formación de soluciones sólidas;
2. los efectos de la formación de la solución sólida sobre las propiedades mecánicas de los materiales metálicos;
3. las condiciones en las que pueden formarse las soluciones sólidas;
4. el desarrollo de algunas ideas básicas concernientes a los diagramas de fases, y
5. el proceso de solidificación en las aleaciones simples.

10-1 Fases y diagrama de fases

Los elementos metálicos puros tienen aplicaciones de ingeniería; por ejemplo, el cobre (Cu) o el aluminio (Al) de pureza ultra alta se utilizan para fabricar circuitería microelectrónica. Sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones se utilizan **aleaciones**. Una "aleación" se define como un material que exhibe propiedades de un material metálico y está conformado por múltiples elementos. Un *acero al carbono simple* es una aleación de hierro (Fe) y carbono (C). Los **aceros inoxidables** resistentes a la corrosión son aleaciones que por lo regular contienen hierro (Fe), carbono (C), cromo (Cr), níquel (Ni) y algunos otros elementos. De manera similar, existen aleaciones basadas en aluminio (Al), cobre (Cu), cobalto (Co), níquel (Ni), titanio (Ti), zinc (Zn) y zirconio (Zr). Existen dos tipos de aleaciones: **aleaciones de una fase** y **aleaciones multifase**. En este capítulo, se examinará el comportamiento de las aleaciones de una fase. Como primera etapa, se define una "fase" y se determina cómo la **regla de las fases** ayuda a determinar el estado —sólido, líquido o gaseoso— en el que existe un material puro.

Una **fase** puede definirse como cualquier porción, incluyendo el total, de un sistema el cual es físicamente homogéneo dentro de sí mismo y delimitado por una superficie que lo separa de cualquier otra porción. Por ejemplo, el agua tiene tres fases —agua líquida, hielo sólido y vapor. Una fase tiene las siguientes características:

1. la misma estructura o arreglo atómico a lo largo de ella;
2. casi la misma composición y propiedades a lo largo de ella, y
3. una interfaz definida entre la fase y cualesquier fase circundante o adjunta.

Por ejemplo, si se encierra un bloque de hielo en una cámara de vacío [figura 10-1a)], el hielo comienza a derretirse y parte del agua se vaporiza. En estas condiciones, se tienen tres fases coexistiendo: H_2O sólida, H_2O líquida y H_2O gaseosa. Cada una de estas formas del H_2O es una fase distinta: cada una tiene un arreglo atómico único, propiedades únicas y un límite definido entre cada forma. En este caso, las fases tienen composiciones idénticas.

Regla de las fases Josiah Willard Gibbs (1839-1903) fue un físico y matemático estadounidense brillante que condujo algunos de los trabajos pioneros más importantes relacionados con el equilibrio termodinámico.

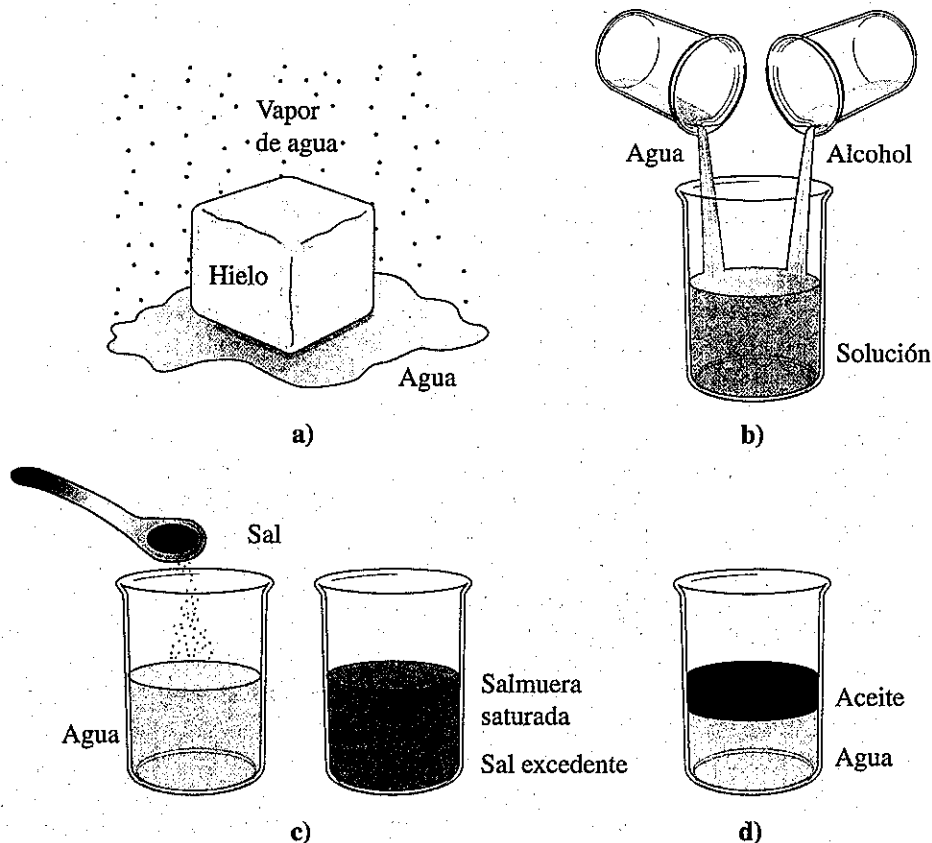


Figura 10-1 Ilustración de las fases y la solubilidad: a) Las tres formas del agua —gaseosa, líquida y sólida— son cada una de ellas una fase. b) El agua y el alcohol tienen solubilidad ilimitada. c) La sal y el agua tienen solubilidad limitada. d) El agua y el aceite virtualmente no tienen solubilidad.

Gibbs desarrolló la **regla de las fases** en 1875-1876. Describe la relación entre el número de componentes y el número de fases para un sistema dado y las condiciones que pueden permitirse que varíen (por ejemplo, la temperatura, la presión, etc.). Tiene la forma general:

$$2 + C = F + P \text{ (cuando la temperatura y la presión pueden variar)} \quad (10-1)$$

Un nemónico útil (algo que le permitirá recordar) para la regla de las fases de Gibbs es comenzar con un numérico y continuar con el resto de los términos de manera alfabética (es decir, C , F y P) empleando en todos los signos positivos. En la regla de fases, C es el número de componentes químicamente independientes, por lo regular los elementos o compuestos, en el sistema; F es el número de grados de libertad o el número de variables (como temperatura, presión o composición), que se permite que varíen de manera independiente sin cambiar el número de fases en equilibrio, y P es el número de fases presentes (por favor, no confunda P con “presión”). La constante “2” en la ecuación 10-1 implica que se permite que la temperatura y la presión varíen. El término “químicamente independiente” se refiere al número de elementos o compuestos diferentes necesarios para especificar un sistema. Por ejemplo, el agua (H_2O) se considera como un sistema de un componente, dado que las concentraciones de H y O en el H_2O no pueden variarse de manera independiente.

Es importante observar que la regla de las fases de Gibbs supone un equilibrio termodinámico y, por lo general en el procesamiento de materiales, se encuentran condiciones en las que *no* se mantiene el equilibrio. Por tanto, no debe sorprenderse al ver que la cantidad

y composiciones de las fases observadas en la práctica sean evidentemente distintos de los pronosticados por la regla de fases de Gibbs.

Otro punto a observar es que las fases no siempre tienen que ser las formas sólida, líquida y gaseosa de un material. Un elemento, como el hierro (Fe), puede existir en estructuras cristalinas CCCa y CCCu. Estas dos formas sólidas del hierro son dos fases distintas del hierro que serán estables a temperaturas y en condiciones de presión distintas. De manera similar, el hielo, por sí mismo, puede existir en varias estructuras cristalinas. El carbono puede existir en varias formas (por ejemplo, grafito o diamante). Éstas sólo son dos de las varias fases posibles del carbono, como se vio en el capítulo 2.

Como ejemplo del uso de la regla de las fases, considere el caso del magnesio puro (Mg). La figura 10-2 muestra un **diagrama de fases unario** ($C = 1$) en el que las líneas dividen las fases líquida, sólida y vapor. A este diagrama de fases unario también se le llama **diagrama P-T** o de presión-temperatura. En el diagrama de fases unario, sólo hay un componente; en este caso, magnesio (Mg). Sin embargo, dependiendo de la temperatura y la presión pueden existir una, dos, o incluso tres *fases* presentes en cualquier tiempo: magnesio sólido, magnesio líquido y vapor de magnesio. Observe que a presión atmosférica (una atmósfera, dada por la línea discontinua), la intersección de las líneas en el diagrama de fases proporciona las temperaturas de fusión y ebullición comunes para el magnesio. A presiones muy bajas, un sólido como el magnesio (Mg) puede *sublimarse*, o pasar de manera directa a una forma de vapor sin fundirse, cuando se calienta.

Suponga que se tiene una combinación de presión y temperatura que definen el punto A en el diagrama de fases (figura 10-2). En este punto, el magnesio es totalmente líquido. El número de fases es uno (líquida). La regla de las fases indica que hay dos grados de libertad. A partir de la ecuación 10-1:

$$2 + C = F + P, \quad \text{por tanto, } 2 + 1 = F + 1 \quad (\text{es decir, } F = 2)$$

¿Qué significa esto? Dentro de los límites, como se observa en la figura 10-2, se puede variar la presión, la temperatura o ambas, y seguir permaneciendo en una porción totalmente líquida del diagrama. Puesto de otra manera, se deben fijar la temperatura y la presión para conocer con precisión en dónde se está en la porción líquida del diagrama.

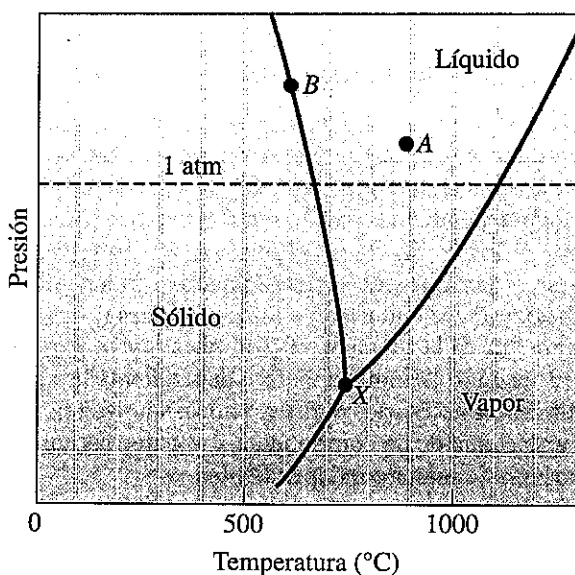


Figura 10-2
Diagrama de fases unario para el magnesio, que muestra las temperaturas de fusión y ebullición a una atmósfera de presión. En este diagrama, el punto X es el punto triple.

Considere el punto *B*, el límite entre las porciones sólida y líquida del diagrama. El número de componentes, *C*, sigue siendo uno, pero en el punto *B*, coexisten el sólido y el líquido, o el número de fases *P* es dos. A partir de la regla de las fases (ecuación 10-1),

$$2 + C = F + P, \text{ por tanto, } 2 + 1 = F + 2 \text{ (es decir, } F = 1\text{)}$$

o sólo hay un grado de libertad. Por ejemplo, si se varía la temperatura, la presión también debe ajustarse para permanecer en el límite donde el líquido y el sólido coexisten. Por otro lado, si se fija la presión, el diagrama de fases indica la temperatura que debe tenerse para que coexistan el sólido y el líquido.

Por último, en el punto *X*, coexisten el sólido, el líquido y el vapor. Mientras el número de componentes siga siendo uno, hay tres fases. El número de grados de libertad es cero:

$$2 + C = F + P, \text{ por tanto, } 2 + 1 = F + 3 \text{ (es decir, } F = 0\text{)}$$

Ahora no se tienen grados de libertad; las tres fases coexisten sólo si se fijan la temperatura y la presión. Un punto en el diagrama de fases en el que coexisten las fases sólida, líquida y gaseosa en condiciones de equilibrio es el **punto triple** (figura 10-2). En los siguientes dos ejemplos, se ve cómo pueden aplicarse algunas de estas ideas que se fundamentan en la regla de las fases de Gibbs.

Ejemplo 10-1

Diseño de un componente aeroespacial

Debido a que el magnesio (Mg) es un material de baja densidad ($\rho_{\text{Mg}} = 1.738 \text{ g/cm}^3$), se ha sugerido para su uso en un vehículo aeroespacial diseñado con la intención de que entre al espacio exterior. ¿Es éste un buen diseño?

SOLUCIÓN

En el espacio la presión es muy baja. Incluso a temperaturas relativamente bajas, el magnesio sólido comienza a transformarse en vapor, lo que ocasiona pérdida del metal que podría dañar un vehículo espacial. Además, la radiación solar pudiera ocasionar que el vehículo se caliente, incrementando la rapidez de pérdida de magnesio.

Un material de baja densidad con un punto de ebullición mayor (y, por tanto, menor presión de vapor a cualquier temperatura dada) podría ser una mejor elección. A presión atmosférica, el aluminio hierve a 2494°C y el berilio (Be) hierve a 2770°C , en comparación con la temperatura de ebullición de 1107°C para el magnesio. Aunque el aluminio y el berilio son un poco más densos que el magnesio, cualquiera podría ser una mejor elección. Dados los efectos tóxicos del Be y de muchos de sus compuestos cuando están pulverizados, se puede desear considerar al aluminio primero.

Existen otros factores a considerar. En las aplicaciones de soporte de carga, no sólo se busca densidad sino también resistencia relativa. Por tanto, la razón del módulo de Young a la densidad o la resistencia a la fluencia (límite elástico) a la densidad pudiera ser un mejor parámetro para comparar los distintos materiales. En esta comparación, se tendrá que estar consciente de que la resistencia a la fluencia, por ejemplo, depende en gran medida de la microestructura y que la resistencia del aluminio puede incrementarse utilizando aleaciones de aluminio, mientras que la densidad se mantiene casi igual. También deben considerarse otros factores como la oxidación durante la reentrada a la atmósfera de la Tierra.

10-2 Solubilidad y soluciones sólidas

Con frecuencia, es benéfico conocer cuánto de cada material o componente se puede combinar sin producir una fase adicional. Cuando se comienzan a combinar distintos componentes o materiales, a medida que se adicionan elementos de aleación a un metal, pueden formarse soluciones sólidas o líquidas. Por ejemplo, cuando se adiciona azúcar al agua, se forma una solución de azúcar. Cuando se difunde un número pequeño de átomos de fósforo (P) en un silicio monocristalino (Si), se produce una solución sólida de P en Si (capítulo 5). En otras palabras, se está interesado en la **solubilidad** de un material en otro (por ejemplo, azúcar en agua, cobre en níquel, fósforo en silicio, etcétera).

Solubilidad ilimitada Suponga que se comienza con un vaso de agua y un vaso de alcohol. El agua es una fase y el alcohol es una segunda fase. Si se vierte el agua en el alcohol y se agita, sólo se produce una fase [figura 10-1b)]. El vaso contiene una solución de agua y alcohol que tiene propiedades y composición únicas. El agua y el alcohol son solubles entre sí. Además, muestran **solubilidad ilimitada**. Independientemente de la razón de agua y alcohol, sólo se produce una fase cuando se mezclan entre sí.

De manera similar, si se mezclaran cantidades cualesquiera de cobre líquido y níquel líquido, sólo se produciría una fase líquida. Esta aleación líquida tiene la misma composición y propiedades en cualquier parte [figura 10-3a)] debido a que el níquel y el cobre tienen solubilidad líquida ilimitada.

Si se solidifica y enfría la aleación líquida de cobre-níquel a temperatura ambiente mientras se mantiene el equilibrio térmico, sólo se produce una fase sólida. Después de la solidificación, los átomos de cobre y níquel no se separan sino que, en vez de eso, se localizan de manera aleatoria dentro de la estructura cristalina CCCa. Dentro de la fase sólida, la estructura, las propiedades y la composición son uniformes y no existe una interfaz entre los átomos de cobre y níquel. Por tanto, el cobre y el níquel también tienen solubilidad sólida ilimitada. La fase sólida es una solución sólida de cobre y níquel [figura 10-3b)].

Una solución sólida *no* es una mezcla. Una mezcla contiene más de un tipo de fase y las características de cada fase se mantienen cuando se forma la mezcla. En contraste con esto, los componentes de una solución sólida se disuelven por completo entre sí y no mantienen sus características individuales.

Otro ejemplo de un sistema que forma una solución sólida es el del titanato de bario (BaTiO_3) y el titanato de estroncio (SrTiO_3), los cuales son compuestos que se encuentran en el sistema ternario $\text{BaO-TiO}_2\text{-SrO}$. Se utilizan soluciones sólidas de BaTiO_3 y SrTiO_3 y otros óxidos para fabricar componentes electrónicos como capacitores. Cada año se fabrican millones de capacitores multicapa utilizando tales materiales (capítulo 19).

Muchos semiconductores compuestos que comparten la misma estructura cristalina forman con facilidad soluciones sólidas con solubilidad del 100%. Por ejemplo, se pueden formar soluciones sólidas de arseniuro de galio (GaAs) y arseniuro de aluminio (AlAs). Los LED rojos más comúnmente utilizados en las pantallas se fabrican utilizando soluciones sólidas basadas en el sistema GaAs-GaP. Las soluciones sólidas pueden formarse utilizando más de dos compuestos o elementos.

Solubilidad limitada Cuando se adiciona una cantidad pequeña de sal (una fase) a un vaso de agua (una segunda fase) y se agita, la sal se disuelve por completo en el agua. Sólo se encuentra una fase —agua salada o salmuera. Sin embargo, si se adiciona demasiada sal al agua, la sal en exceso se hunde a la parte inferior del vaso [figura 10-1c)]. Ahora se tienen dos fases —el agua que está saturada con sal más la sal sólida en exceso—. Se encuentra que la sal tiene una **solubilidad limitada** en el agua.

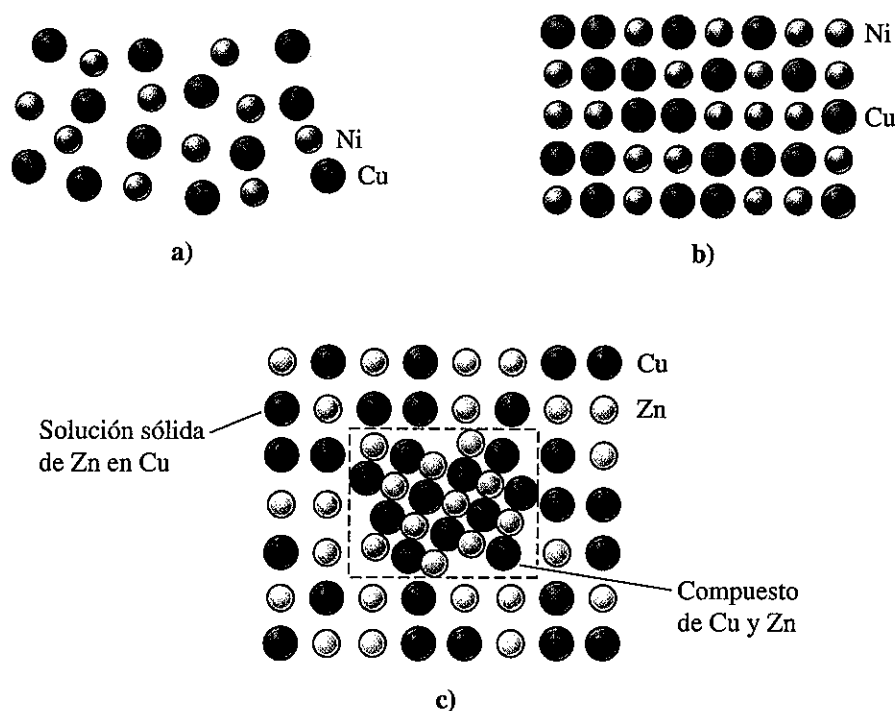


Figura 10-3 a) El cobre líquido y el níquel líquido son solubles por completo entre sí. b) Las aleaciones sólidas de cobre-níquel muestran una solubilidad sólida completa, con átomos de cobre y níquel ocupando sitios de red aleatorios. c) En las aleaciones de cobre-zinc que contienen más de 30% de Zn, se forma una segunda fase debido a la solubilidad limitada del zinc en cobre.

Si se adiciona una cantidad pequeña de zinc líquido al cobre líquido, se produce una sola solución líquida. Cuando la solución de cobre-zinc se enfría y solidifica, resulta una sola solución sólida que tiene una estructura CCCa, con los átomos de cobre y zinc localizados de manera aleatoria en los puntos de red normales. Si la solución líquida contiene más de alrededor del 30% de Zn, una parte de los átomos del zinc en exceso se combinan con una parte de los átomos de cobre para formar un compuesto de CuZn [figura 10-3c)]. Ahora coexisten dos fases sólidas: una solución sólida de cobre saturado con alrededor de 30% de Zn más un compuesto de CuZn. La solubilidad del zinc en cobre es limitada. La figura 10-4 muestra una porción del diagrama de fases del Cu-Zn que ilustra la solubilidad del zinc en cobre a temperaturas bajas. La solubilidad aumenta con el incremento de la temperatura. Esto es similar a cómo se puede disolver más azúcar o sal en agua incrementando la temperatura.

En el capítulo 5 se examinó cómo el silicio (Si) puede doparse con fósforo (P), boro (B) o arsénico (As). Todos estos elementos dopantes exhiben solubilidad limitada en Si (es decir, a concentraciones pequeñas forman una solución sólida con el Si). Por tanto, se producen soluciones sólidas incluso si hay solubilidad limitada. No se necesita una solubilidad sólida del 100% para formar soluciones sólidas. Observe que las soluciones sólidas pueden formarse por medio de mecanismos sustitucionales o intersticiales. Los átomos o iones huéspedes pueden entrar en la estructura cristalina anfitriona en las posiciones cristalográficas o en los intersticios regulares.

En el caso extremo, puede no haber casi solubilidad de un material en otro. Esto es verdadero para el aceite y el agua [figura 10-1d)] o para las aleaciones de cobre-plomo (Cu-Pb). Observe que aun cuando los materiales no se disuelven entre sí pueden dispersarse uno en el otro. Por ejemplo, pueden mezclarse fases parecidas al aceite y líquidos acuosos, con frecuencia empleando surfactantes (moléculas parecidas al jabón), para formar emulsiones. La inmiscibilidad, o falta de solubilidad, se observa en muchos materiales cerámicos y metálicos fundidos y sólidos.

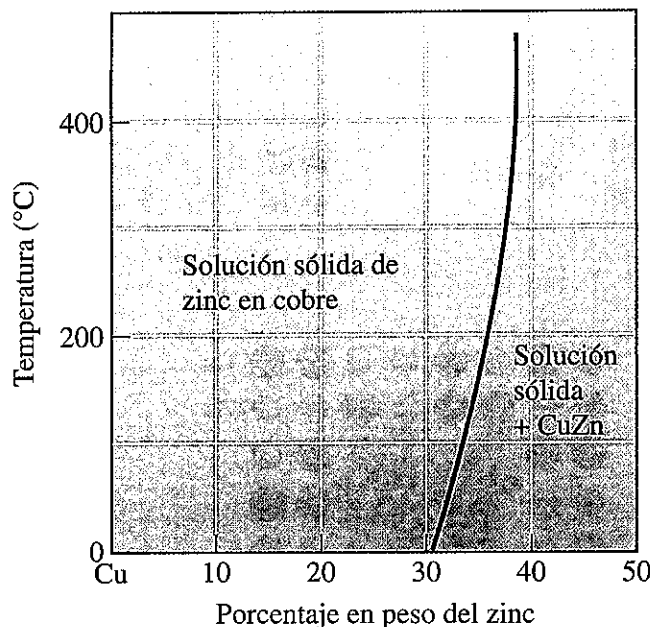


Figura 10-4

Solubilidad del zinc en cobre. La línea sólida representa el límite de solubilidad; cuando se adiciona zinc en exceso, se excede el límite de solubilidad y coexisten dos fases.

Sistemas poliméricos

Se pueden procesar materiales poliméricos para mejorar su utilidad empleando un concepto similar a la formación de soluciones sólidas en sistemas metálicos y cerámicos. Se pueden formar materiales conocidos como **copolímeros** que consisten en distintos monómeros. Por ejemplo, los monómeros acrilonitrilo (A), butadieno (B) y estireno (S) pueden hacerse reaccionar para formar un copolímero conocido como ABS. Este copolímero resultante es similar a una solución sólida que posee las funcionalidades de los tres monómeros a partir de los cuales se deriva, mezclando sus propiedades. De manera similar a las soluciones sólidas de Cu-Ni o de BaTiO₃-SrTiO₃, no es posible separar el acrilonitrilo, el butadieno o el estireno de un plástico ABS. Se emplea el moldeo por inyección para convertir el ABS en teléfonos, cascos, volantes de automóviles y estuches de aparatos pequeños. La figura 10-5 ilustra las propiedades de los distintos copolímeros en el sistema ABS. Observe que éste *no* es un diagrama de fases. El Dylark™ es otro ejemplo de un copolímero. Se forma utilizando anhídrido maleico y un monómero de estireno. El copolímero Dylark™, con negro de carbón para protección UV, reforzado con fibra de vidrio y endurecido con caucho, se ha utilizado para los paneles de instrumentos en muchos automóviles (capítulo 16).

10-3 Condiciones para la solubilidad sólida ilimitada

Para que un sistema de aleación, como el cobre-níquel tenga solubilidad sólida ilimitada, deben satisfacerse ciertas condiciones. Estas condiciones, conocidas como las **reglas de Hume-Rothery**, son las siguientes:

1. **Factor de tamaño:** Los átomos o iones deben ser de tamaño similar, con no más del 15% de diferencia en el radio atómico, para minimizar la deformación de red (es decir, minimizar, a un nivel atómico, las desviaciones ocasionadas en el espaciado interatómico).
2. **Estructura cristalina:** Los materiales deben poseer la misma estructura cristalina; de lo contrario, existe un punto en el que ocurre una transición de una fase a una segunda fase con una estructura diferente.
3. **Valencia:** Los iones deben tener la misma valencia; de no ser así, la diferencia en electrones de valencia promueve la formación de compuestos en vez de soluciones.

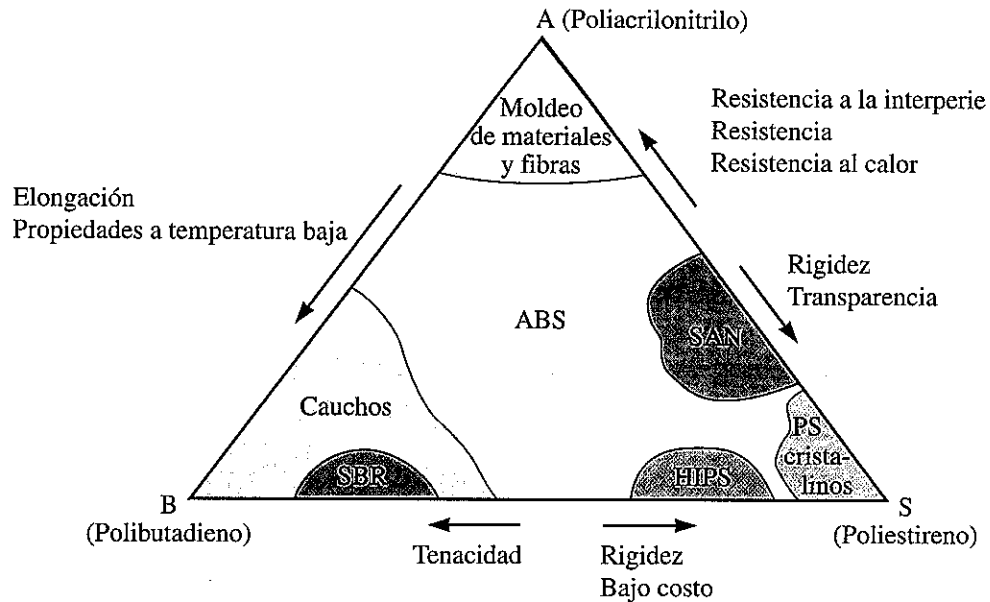


Figura 10-5 Diagrama que muestra cómo varían las propiedades de los copolímeros formados en el sistema ABS. Éste no es un diagrama de fases. (De Strong, A. Brent, *Plastics: Materials and Processing*, 2a ed., ©2000. Reproducida de manera electrónica con permiso de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.)

4. **Electronegatividad:** Los átomos deben tener aproximadamente la misma electronegatividad. La electronegatividad es la afinidad para los electrones (capítulo 2). Si las electronegatividades difieren de manera significativa, se forman compuestos —como cuando los iones sodio y cloruro se combinan para formar cloruro de sodio.

Las condiciones de Hume-Rothery deben satisfacerse, pero no son necesariamente suficientes, para que dos metales (por ejemplo, Cu y Ni) o compuestos (por ejemplo, BaTiO_3 - SrTiO_3) tengan solubilidad sólida ilimitada.

La figura 10-6 muestra de manera esquemática las estructuras bidimensionales del MgO y del NiO. Los iones Mg^{+2} y Ni^{+2} son similares en tamaño y valencia y, en consecuencia,

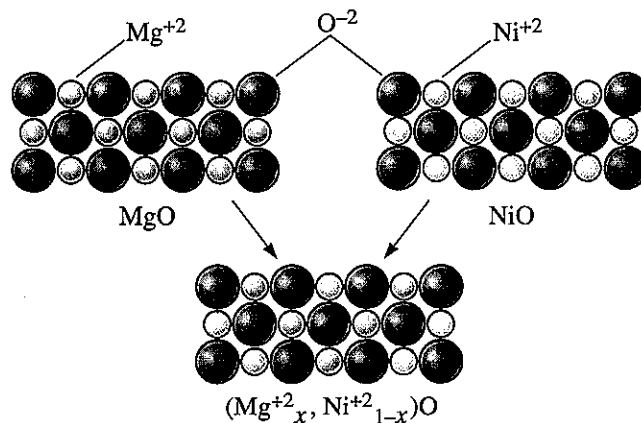


Figura 10-6
El MgO y el NiO tienen estructuras cristalinas, radios iónicos y valencias similares; por tanto los dos materiales cerámicos pueden formar soluciones sólidas.

pueden reemplazarse entre sí en una estructura cristalina de cloruro de sodio (NaCl) (capítulo 3), formando una serie completa de soluciones sólidas de la forma $(\text{Mg}_x^{+2}\text{Ni}_{1-x}^{+2})\text{O}$, donde x = la fracción molar de Mg^{+2} o MgO .

La solubilidad de los átomos intersticiales siempre es limitada. Los átomos intersticiales son mucho más pequeños que los átomos del elemento anfitrión, por tanto no cumplen la primera de las condiciones de Hume-Rothery.

Ejemplo 10-2

¿Se puede formar una solución sólida de NiO en MgO?

Puede adicionarse NiO al MgO para producir una solución sólida. ¿Qué otros sistemas cerámicos es probable que exhiban una solubilidad sólida del 100% con el MgO?

SOLUCIÓN

En este caso, se deben considerar aditivos óxidos que posean cationes metálicos con la misma valencia y radio iónico como el de los cationes de magnesio. La valencia del ion magnesio es +2 y su radio iónico es 0.66 Å. A partir del apéndice B, algunas otras posibilidades en las que el catión tiene una valencia +2 incluyen las siguientes:

	$r(\text{Å})$	$\left[\frac{r_{\text{ion}} - r_{\text{Mg}^{+2}}}{r_{\text{Mg}^{+2}}} \right] \times 100\%$	Estructura cristalina
Cd^{+2} en CdO	$r_{\text{Cd}^{+2}} = 0.97$	47	NaCl
Ca^{+2} en CaO	$r_{\text{Ca}^{+2}} = 0.99$	50	NaCl
Co^{+2} en CoO	$r_{\text{Co}^{+2}} = 0.72$	9	NaCl
Fe^{+2} en FeO	$r_{\text{Fe}^{+2}} = 0.74$	12	NaCl
Sr^{+2} en SrO	$r_{\text{Sr}^{+2}} = 1.12$	70	NaCl
Zn^{+2} en ZnO	$r_{\text{Zn}^{+2}} = 0.74$	12	NaCl

También se muestra la diferencia porcentual en los radios iónicos y en las estructuras cristalinas y sugiere que el sistema FeO-MgO probablemente mostrará solubilidad sólida ilimitada. Los sistemas CoO y ZnO también tienen razones de radios y estructuras cristalinas apropiadas.

10-4 Endurecimiento por solución sólida

En los materiales metálicos, uno de los efectos importantes de la formación de soluciones sólidas es el **endurecimiento por solución sólida** resultante (figura 10-7). Este endurecimiento, por medio de la formación de soluciones sólidas, es ocasionado por el incremento en la resistencia al movimiento de las dislocaciones. Ésta es una de las razones importantes de por qué el latón (aleación de Cu-Zn) es más resistente que el cobre puro. Aprenderá posteriormente que el carbono también desempeña otra función en el endurecimiento de los aceros formando carburo de hierro (Fe_3C) y otras fases (capítulo 12). Los artículos de joyería pudieran fabricarse de oro o plata puros; sin embargo, el oro puro y la plata pura son extremadamente blandos y maleables. Los joyeros adicionan cobre al oro y a la plata para que los artículos de joyería mantengan su forma.

En el sistema de cobre-níquel (Cu-Ni), se introduce de manera intencional un átomo sustitucional sólido (níquel) en la estructura cristalina original (cobre). La aleación de cobre-níquel es más resistente que el cobre puro. De manera similar, si se añade menos de 30% de Zn

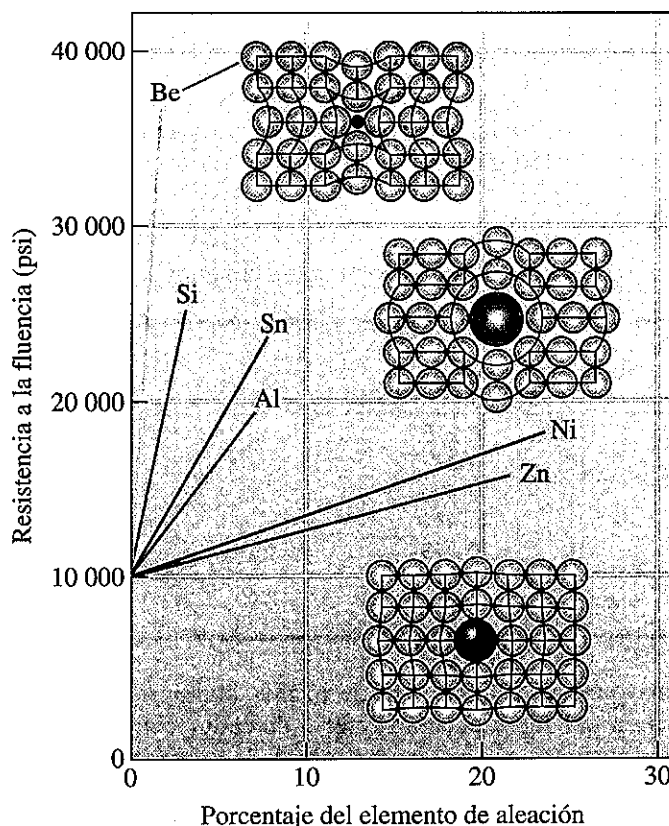


Figura 10-7

Efectos de varios elementos de aleación sobre la resistencia a la fluencia del cobre. Los átomos de níquel y zinc son casi del mismo tamaño que los átomos de cobre, pero los átomos de berilio y estaño son muy distintos de los átomos del cobre. El incremento de la diferencia en el tamaño atómico y la cantidad del elemento de aleación aumenta el endurecimiento por solución sólida.

al cobre, el zinc se comporta como un átomo sustitucional que endurece la aleación de cobre-zinc, en comparación con el cobre puro.

Recuerde del capítulo 7 que la resistencia de las cerámicas está dictaminada de manera principal por la distribución de las imperfecciones; la formación de soluciones sólidas no tiene un gran efecto sobre sus propiedades mecánicas. Esto es similar a por qué el endurecimiento por deformación no era un factor en el incremento de la resistencia de las cerámicas o semiconductores como el silicio (capítulo 8). Como se explicó anteriormente, la formación de soluciones sólidas en las cerámicas y los semiconductores (como el Si, GaAs, etc.) tienen una influencia considerable sobre las propiedades magnéticas, ópticas y dieléctricas. La siguiente explicación relacionada con las propiedades mecánicas, por tanto, se aplica de manera principal a los materiales metálicos.

Grado de endurecimiento por solución sólida El grado de endurecimiento por solución sólida depende de dos factores. Primero, una gran diferencia en el tamaño atómico entre el átomo original (anfitrión o solvente) y el átomo adicionado (huésped o soluto) incrementa el efecto del endurecimiento. Una diferencia mayor en el tamaño produce una disrupción mayor de la estructura cristalina inicial, haciendo más difícil el deslizamiento (figura 10-7).

Segundo, mientras mayor sea la cantidad del elemento de aleación adicionado, mayor el efecto de endurecimiento (figura 10-7). Una aleación de Cu-20% Ni es más resistente que una aleación de Cu-10% Ni. Por supuesto, si se adiciona demasiado de un átomo grande o pequeño, puede excederse el límite de solubilidad y se produce un mecanismo de endurecimiento distinto, **endurecimiento por dispersión**. En el endurecimiento por dispersión, la interfaz entre la fase anfitriona y la fase huésped resiste el movimiento de las dislocaciones y contribuye al endurecimiento. Este mecanismo se explica más adelante en el capítulo 11.

Ejemplo 10-3**Endurecimiento por solución sólida**

A partir de los radios atómicos, muestre si la diferencia en tamaño entre los átomos de cobre y los átomos de aleación predicen de manera precisa la cantidad de endurecimiento encontrada en la figura 10-7.

SOLUCIÓN

Los radios atómicos y la diferencia porcentual de tamaños se muestran abajo.

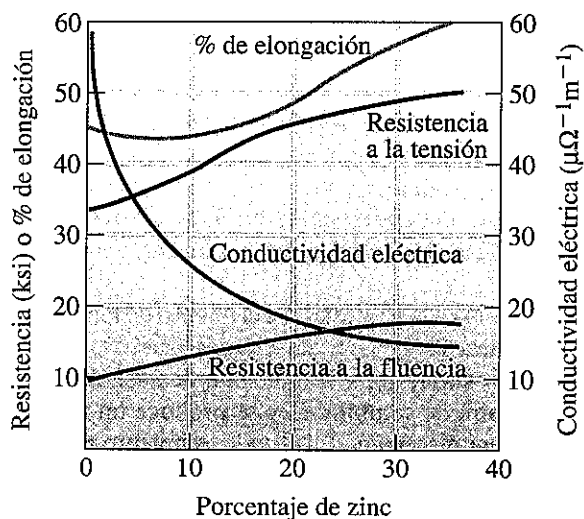
Metal	Radio atómico (Å)	$\left[\frac{r_{\text{átomo}} - r_{\text{Cu}}}{r_{\text{Cu}}} \right] \times 100 \%$
Cu	1.278	0
Zn	1.332	+4.2
Sn	1.405	+9.9
Al	1.432	+12.1
Ni	1.243	-2.7
Si	1.176	-8.0
Be	1.143	-10.6

Para átomos mayores que el cobre —es decir, zinc, aluminio y estaño— el incremento de la diferencia en tamaño aumenta el efecto de endurecimiento. De manera similar para los átomos más pequeños, el incremento de la diferencia en tamaño aumenta el endurecimiento.

Efecto del endurecimiento por solución sólida sobre las propiedades

Los efectos del endurecimiento por solución sólida sobre las propiedades de un metal incluyen los siguientes (figura 10-8):

1. La resistencia a la fluencia, la resistencia a la tensión y la dureza de la aleación son mayores que las de los metales puros. Ésta es una razón de por qué se utilizan con mayor frecuencia aleaciones en vez de metales puros. Por ejemplo, se adicionan concentraciones pequeñas de Mg al aluminio para proveer una mayor resistencia a las aleaciones de aluminio utilizadas en la fabricación de latas de bebidas de aluminio.

**Figura 10-8**

Efecto de las adiciones de zinc al cobre sobre las propiedades de la aleación endurecida por solución sólida. El incremento en el porcentaje de elongación con el incremento del contenido de zinc *no* es común del endurecimiento por solución sólida.

2. Casi siempre, la ductilidad de la aleación es menor que la del metal puro. Sólo en raras ocasiones, como en las aleaciones de cobre-zinc, el endurecimiento por solución sólida incrementa la resistencia y la ductilidad.
3. La conductividad eléctrica de la aleación es mucho menor que la del metal puro (capítulo 19). Esto se debe a que los electrones son dispersados más por los átomos de los elementos de aleación que los átomos anfitriones. No se recomienda el endurecimiento por solución sólida de los alambres de cobre o aluminio empleados para la transmisión de energía eléctrica debido a este efecto pronunciado. La conductividad eléctrica de muchas aleaciones, aunque menor que la de los metales puros, con frecuencia es más estable como una función de la temperatura.
4. La resistencia a la termofluencia y la resistencia a temperaturas elevadas son mejoradas por el endurecimiento por solución sólida. Muchas aleaciones para temperatura alta, como las utilizadas para motores de jets, dependen parcial o ampliamente del endurecimiento por solución sólida.

10-5 Diagramas de fases isomorfos

Un **diagrama de fases** muestra las fases y sus composiciones a cualquier combinación de temperatura y composición de la aleación. Cuando sólo se presentan dos elementos o dos compuestos en un material, se puede trazar un **diagrama de fases binario**. Los **diagramas de fases isomorfos** se encuentran en varios sistemas metálicos y cerámicos. En los sistemas isomorfos, los cuales incluyen los sistemas de cobre-níquel y de NiO-MgO [figura 10-9a) y b)], sólo se forma una fase sólida; los dos componentes en el sistema muestran solubilidad sólida completa. Como se muestra en los diagramas de fases para los sistemas de $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ - SrO y de talio-plomo (Tl-Pb), es posible tener diagramas de fases que muestren un punto mínimo o máximo, respectivamente [figura 10-9c) y d)]. Observe que la escala horizontal puede representar el porcentaje molar o porcentaje en peso de uno de los componentes. También se puede graficar el porcentaje atómico o la fracción molar de uno de los componentes. También, observe que el diagrama para el $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ y el $\text{SrO} \cdot \text{SiO}_2$ podría graficarse como un *diagrama de fases ternario*. Un diagrama de fases ternario es un diagrama de fases para sistemas que consisten en tres componentes. Aquí, se representa como un *diagrama pseudobinario* (es decir, se supone que es un diagrama que representa el equilibrio de fases entre el $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ y el $\text{SrO} \cdot \text{SiO}_2$). En los diagramas pseudobinarios, se representan los equilibrios entre tres o más componentes utilizando dos compuestos. Los diagramas de fases ternarios se encuentran con frecuencia en sistemas cerámicos y metálicos.

Recientemente se han realizado desarrollos considerables en diagramas de fases que emplean bases de datos de computadora que contienen propiedades termodinámicas de los distintos elementos y compuestos. Existen varias piezas de información valiosas que se obtienen a partir de los diagramas de fases, como sigue.

Temperaturas de liquidus y de solidus Se define la **temperatura de liquidus** como la temperatura por encima de la cual un material es líquido por completo. La curva superior en la figura 10-9a), conocida como **liquidus**, representa las temperaturas de liquidus para aleaciones de cobre-níquel de distintas composiciones. Se debe calentar una aleación de cobre-níquel por encima de la temperatura de liquidus para producir una aleación líquida por completo que puede colarse para producir una forma útil. La aleación líquida comienza a solidificarse cuando la temperatura disminuye a la temperatura de liquidus. Para la aleación de Cu-40% Ni en la figura 10-9a), la temperatura de liquidus es de 1280 °C.

La **temperatura de solidus** es la temperatura por debajo de la cual la aleación es 100% sólida. La curva inferior en la figura 10-9a), conocida como **solidus**, representa las temperaturas de solidus para aleaciones de Cu-Ni de distintas composiciones. Una aleación

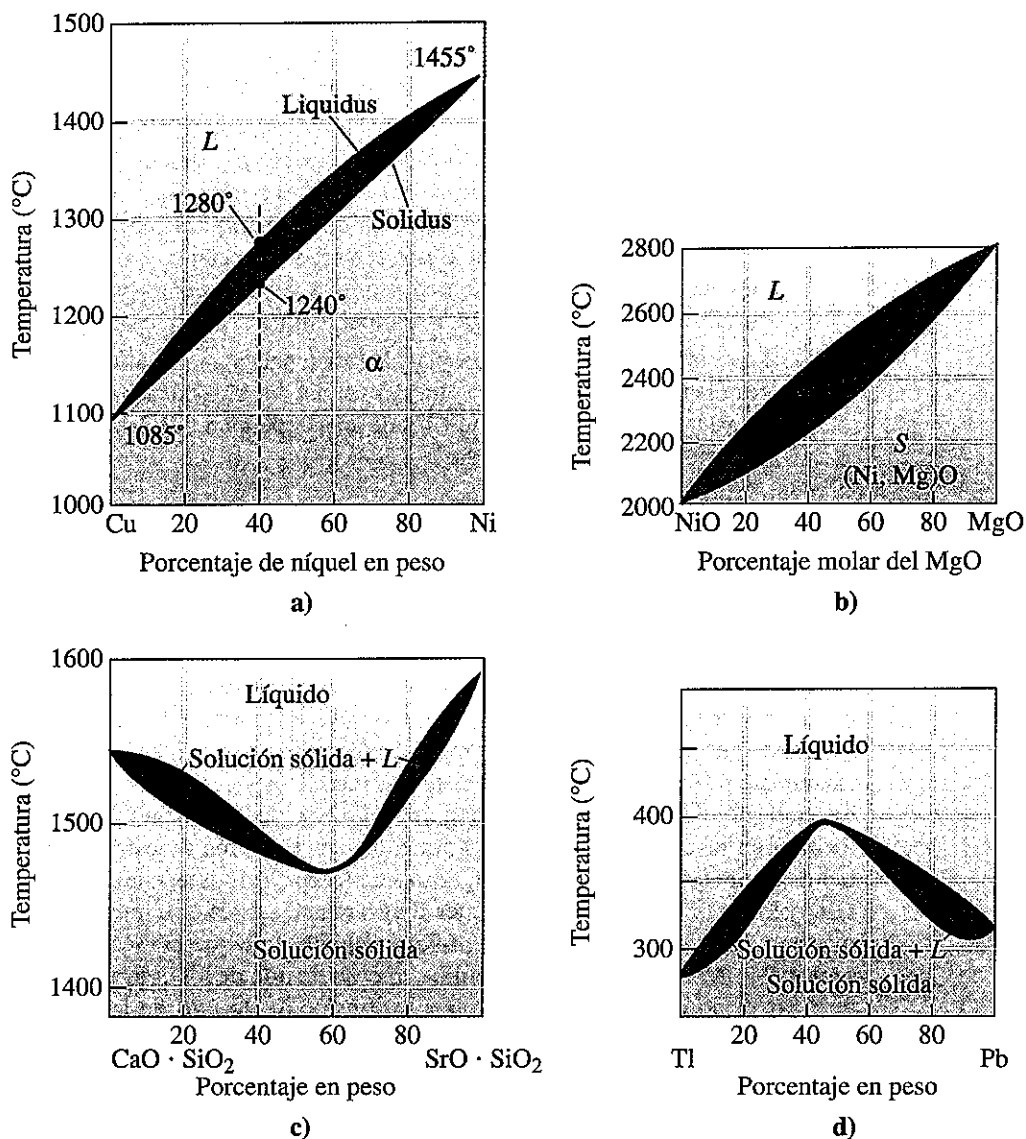


Figura 10-9 a) y b) Diagramas de fases de equilibrio para los sistemas de Cu-Ni y NiO-MgO. Se muestran las temperaturas de liquidus y solidus para una aleación de Cu-40% Ni. c) y d) Sistemas con máximos y mínimos de solución sólida. (Adaptada a partir de *Introduction to Phase Equilibria*, por C. G. Bergeron y S. H. Risbud. Copyright © 1984 American Ceramic Society. Adaptada con permiso.)

de cobre-níquel no es sólida por completo hasta que el material se enfría por debajo de la temperatura de solidus. Si se utiliza una aleación de cobre-níquel a temperaturas altas, se debe asegurar que la temperatura de servicio esté por debajo de la de solidus para que no ocurra fusión. Para la aleación de Cu-40% Ni en la figura 10-9a) la temperatura de solidus es de 1240 °C.

Las aleaciones de cobre-níquel se funden y se solidifican en un intervalo de temperaturas entre la de liquidus y la de solidus. La diferencia en temperatura entre el liquidus y el solidus es el **intervalo de solidificación** de la aleación. Dentro de este intervalo, coexisten dos fases: una líquida y una sólida. La sólida es una solución de átomos de cobre y níquel y se designa como la fase α . Para la aleación de Cu-40% Ni (fase α) en la figura 10-9a), el **intervalo de solidificación** es de $1280 - 1240 = 40$ °C. Observe que los metales puros se solidifican a una temperatura fija (es decir, el intervalo de solidificación es de cero grados).

Fases presentes Con frecuencia se tiene interés en saber qué fases están presentes en una aleación a una temperatura en particular. Si se planea producir una pieza colada, se debe asegurar que el metal es inicialmente líquido por completo; si se planea tratar de manera térmica un componente de aleación, se debe asegurar que no se forme ningún líquido durante el proceso. Diferentes fases sólidas tienen distintas propiedades. Por ejemplo, el Fe CCCu (indicado como la fase α en el diagrama de fases de hierro-carbono) es ferromagnético; sin embargo, el hierro CCCa (indicado como la fase γ en el diagrama de Fe-C) no lo es.

El diagrama de fases puede tratarse como un mapa de carreteras; si se conocen las coordenadas —la temperatura y la composición de la aleación— se pueden determinar las fases presentes, suponiendo que se sabe que existe equilibrio termodinámico. Existen muchos ejemplos de situaciones importantes de manera tecnológica donde no se desea que se formen fases en equilibrio. Por ejemplo, en la formación del vidrio de silicato, se desea que se forme un vidrio amorfo y no SiO_2 cristalino. Cuando se endurecen los aceros enfriándolos de manera rápida desde una temperatura alta, el endurecimiento ocurre debido a la formación de fases que no están en equilibrio. En tales casos, los diagramas de fases **no** proporcionarán toda la información que se necesita. En tales casos, se necesitan diagramas especiales que tomen en cuenta el efecto del tiempo (es decir, la cinética) sobre las transformaciones de fase. En capítulos posteriores se examinará el uso de tales diagramas.

Los siguientes dos ejemplos ilustran las aplicaciones de algunos de estos conceptos.

Ejemplo 10-4

Diagrama binario de NiO-MgO

A partir del diagrama de fases para el sistema binario NiO-MgO [figura 10-9b)], describa una composición que puede fundirse a 2600 °C pero que no se funda cuando se coloque en servicio a 2300 °C.

SOLUCIÓN

El material debe tener una temperatura de liquidus por debajo de 2600 °C, pero una temperatura de solidus por encima de 2300 °C. El diagrama de fases de NiO-MgO [figura 10-9b)] permite elegir una composición apropiada.

Para identificar una composición con una temperatura de liquidus por debajo de 2600 °C, debe haber menos del 60% molar de MgO en el refractario. Para identificar una composición con una temperatura de solidus por encima de 2300 °C, debe haber presente al menos 50% molar de MgO. En consecuencia, se puede utilizar cualquier composición entre 50 y 60% molar de MgO.

Ejemplo 10-5

Diseño de un material compuesto

Un método para mejorar la tenacidad a la fractura de un material cerámico (capítulo 7) es reforzar la matriz cerámica con fibras cerámicas. Un diseñador de materiales ha sugerido que el Al_2O_3 pudiera reforzarse con 25% de fibras de Cr_2O_3 , las cuales interferirían con la propagación de cualquier grieta en la alúmina. Se espera que el compuesto resultante opere bajo carga a 2000 °C por varios meses.

Critique la idoneidad de este diseño.

SOLUCIÓN

Dado que el compuesto operará a temperaturas altas por un periodo de tiempo sustancial, las dos fases —las fibras de Cr_2O_3 y la matriz de Al_2O_3 — no deben reaccionar entre sí.

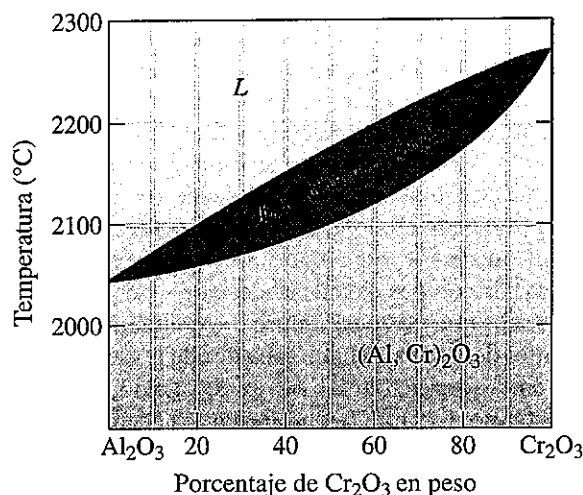


Figura 10-10
Diagrama de fases de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$
(para el ejemplo 10-5).

Además, el compuesto debe permanecer sólido al menos hasta 2000 °C. El diagrama de fases en la figura 10-10 permite considerar esta elección para un compuesto.

El Cr_2O_3 puro, el Al_2O_3 puro, y la aleación de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-25\% Cr}_2\text{O}_3$ tienen temperaturas de solidus por encima de 2000 °C; en consecuencia, no hay peligro de fundir cualquiera de los constituyentes; sin embargo, el Cr_2O_3 y el Al_2O_3 muestran solubilidad sólida ilimitada. A la temperatura de servicio alta, de 2000 °C, los iones Al^{3+} se difundirán de la matriz a las fibras, reemplazando los iones Cr^{3+} en las fibras. De manera simultánea, los iones Cr^{3+} reemplazarán los iones Al^{3+} en la matriz. Mucho antes de que hayan transcurrido varios meses, este proceso de difusión ocasionará que las fibras se disuelvan por completo en la matriz. Sin fibras restantes, la tenacidad a la fractura será de nuevo mala.

Composición de cada fase Para cada fase, se puede especificar una composición, expresada como el porcentaje de cada elemento en la fase. Por lo general la composición se expresa en porcentaje en peso (%pe). Cuando sólo está presente una fase en la aleación o solución sólida cerámica, la composición de la fase es igual a la composición total del material. Si la composición original de una aleación o de un material cerámico con una sola fase cambia, la composición de la fase también debe cambiar.

Cuando dos fases, como la líquida y la sólida, coexisten, sus composiciones difieren entre sí y también de la composición general original. En este caso, si la composición original cambia de manera ligera, no se afecta la composición de las dos fases, siempre que la temperatura permanezca constante.

Esta diferencia se explica por medio de la regla de las fases de Gibbs. En este caso, a diferencia del ejemplo del magnesio puro (Mg) descrito anteriormente, se mantiene fija la presión a una atmósfera, la cual es la normal para los diagramas de fases binarios. La regla de las fases dada por la ecuación 10-1 puede reescribirse como

$$1 + C = F + P \quad (\text{para presión constante}) \quad (10-2)$$

donde, de nuevo, C es el número de componentes químicos independientes, P es el número de fases (*no presión*) y F es el número de grados de libertad. Ahora se utiliza el número 1 en vez de 2 debido a que se está manteniendo la presión constante. Esto reduce el número de grados de libertad en 1. Por lo regular la presión es de, aunque no necesariamente, una atmósfera.

En un sistema binario, el número de componentes C es dos; los grados de libertad que se han incluido cambian la temperatura y la composición de las fases presentes. Se puede aplicar esta forma de la regla de las fases al sistema de Cu-Ni, como se muestra en el ejemplo 10-6.

Ejemplo 10-6

Regla de Gibbs para un diagrama de fases isomorfo

Determine los grados de libertad en una aleación de Cu-40% Ni a a) 1300 °C, b) 1250 °C y c) 1200 °C. Utilice la figura 10-9a).

SOLUCIÓN

Éste es un sistema binario ($C = 2$). Los dos componentes son el Cu y el Ni. Se supondrá una presión constante. Por tanto, puede utilizarse la ecuación 10-2 ($1 + C = F + P$) como se muestra:

a) A 1300 °C, $P = 1$, dado que sólo está presente una fase (líquida); $C = 2$, dado que están presentes átomos de cobre y níquel. Por tanto,

$$1 + C = F + P \quad \therefore 1 + 2 = F + 1 \text{ o } F = 2$$

Se debe fijar la temperatura y la composición de la fase líquida para describir por completo el estado de la aleación de cobre-níquel en la región líquida.

b) A 1250 °C, $P = 2$, dado que están presentes las fases líquida y sólida; $C = 2$, dado que están presentes átomos de cobre y níquel. Ahora,

$$1 + C = F + P \quad \therefore 1 + 2 = F + 2 \text{ o } F = 1$$

Si se fija la temperatura en la región de las dos fases, también se fijan las composiciones de las dos fases. De manera alterna, si se fija la composición de una fase, la temperatura y la composición de la segunda fase se fijan de manera automática.

c) A 1200 °C, $P = 1$, dado que sólo se presenta una fase (sólida); $C = 2$, dado que están presentes átomos de cobre y níquel. De nuevo,

$$1 + C = F + P \quad \therefore 1 + 2 = F + 1 \text{ o } F = 2$$

y se deben fijar la temperatura y la composición para describir por completo el estado del sólido.

Debido a que sólo hay un grado de libertad en una región de dos fases de un diagrama de fases binario, las composiciones de las dos fases siempre se fijan cuando se especifica la temperatura. Esto es verdadero incluso si la composición general de la aleación cambia. Por tanto, se puede utilizar una línea de interconexión para determinar la composición de las dos fases. Una **línea de interconexión** es una línea horizontal dentro de una región de dos fases trazada a la temperatura de interés (figura 10-11). En un sistema isomorfo, la línea de interconexión conecta los puntos de liquidus y solidus a la temperatura especificada. Los extremos de la línea de interconexión representan las composiciones de las dos fases en equilibrio. Las líneas de interconexión no se utilizan en regiones de una sola fase debido a que no se tienen dos fases que se tengan que "interconectar".

Para cualquier aleación con una composición general o voluminosa que se encuentre entre c_L y c_S , la composición del líquido es c_L y la composición del sólido α es c_S .

El siguiente ejemplo ilustra cómo se emplea el concepto de línea de interconexión para determinar la composición de las distintas fases en equilibrio.

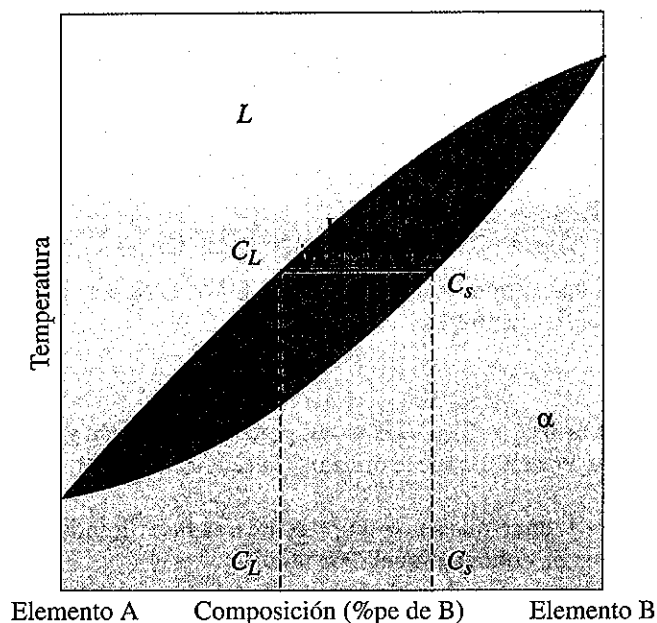


Figura 10-11
Diagrama de fases binario hipotético entre dos elementos A y B. Cuando se presenta una aleación en una región de dos fases, una línea de interconexión a la temperatura de interés fija la composición de las dos fases. Esto es una consecuencia de la regla de las fases de Gibbs, la cual provee sólo un grado de libertad en la región de dos fases.

Ejemplo 10-7

Composiciones de las fases en el diagrama de fases de Cu-Ni

Determine la composición de cada fase en una aleación de Cu-40% Ni a 1300 °C, 1270 °C, 1250 °C y 1200 °C (véase la figura 10-12).

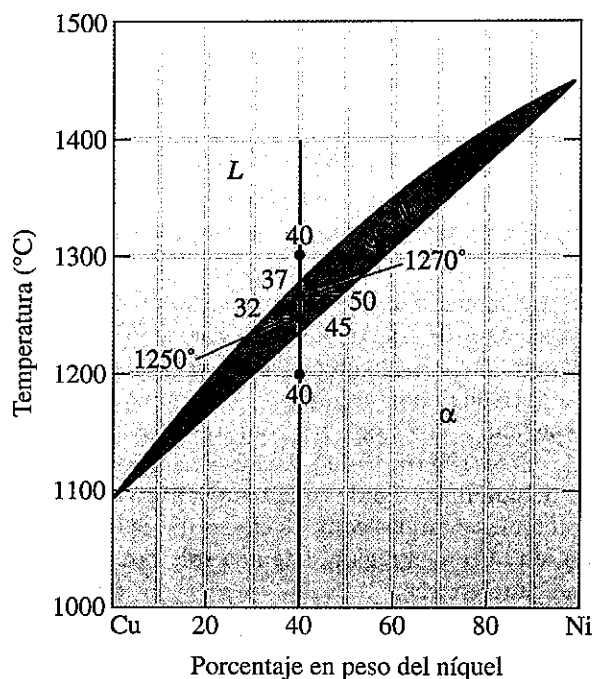


Figura 10-12
Líneas de interconexión y composiciones de las fases para una aleación de Cu-40% Ni a varias temperaturas (para el ejemplo 10-7).

SOLUCIÓN

La línea vertical a 40% de Ni representa la composición general de la aleación:

- **1300 °C:** Sólo hay líquido. El líquido debe contener 40% de Ni, la composición general de la aleación.
- **1270 °C:** Se presentan dos fases. Se traza una línea horizontal dentro del campo $\alpha + L$. El punto extremo en el liquidus, el cual está en contacto con la región líquida, está a 37% de Ni. El punto extremo en el solidus, el cual está en contacto con la región α , está a 50% de Ni. Por tanto, el líquido contiene 37% de Ni y el sólido contiene 50% de Ni.
- **1250 °C:** De nuevo se presentan dos fases. La línea de interconexión trazada a esta temperatura muestra que el líquido contiene 32% de Ni y que el sólido contiene 45% de Ni.
- **1200 °C:** Sólo se presenta el sólido α , por lo que el sólido debe contener 40% de Ni.

En el ejemplo 10-7, se encuentra que, en la región de dos fases, el sólido α contiene más níquel y el líquido L contiene más cobre que la composición general de la aleación. Por lo general, el elemento con el punto de fusión más alto (en este caso, el níquel) se concentra en el primer sólido que se forma.

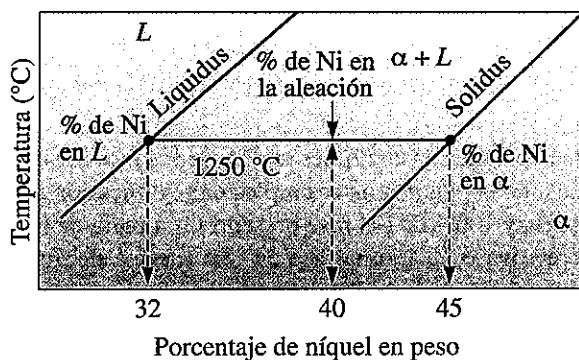
Cantidad de cada fase (regla de la palanca) Por último, el interés es en las cantidades relativas de cada fase presentes en la aleación. Estas cantidades se expresan por lo general como porcentaje en peso (%pe). Las cantidades absolutas de las distintas fases se expresan en unidades de masa o peso (gramos, kilogramos, libras, etc.). El siguiente ejemplo ilustra el raciocinio de la **regla de la palanca**.

Ejemplo 10-8

Calcule las cantidades de α y L a 1250 °C en la aleación de Cu-40% Ni mostrada en la figura 10-13.

SOLUCIÓN

Sea x = la fracción másica de la aleación que es el sólido α . Dado que sólo se tienen dos fases, el balance de la aleación debe estar en la fase líquida (L). Por tanto, la fracción

**Figura 10-13**

Línea de interconexión a 1250 °C en el sistema cobre-níquel que se utiliza en el ejemplo 10-8 para encontrar la cantidad de cada fase.

másica del líquido será $1 - x$. Considere 100 gramos de la aleación. Esta aleación consistirá en 40 gramos de níquel a todas las temperaturas. A 1250°C , se escribe una ecuación que represente el balance másico para el níquel. A 1250°C , se tienen $100x$ gramos de la fase α . Se tienen $100(1 - x)$ gramos de líquido.

$$\text{Masa total del níquel en 100 gramos de la aleación} = \text{masa del níquel en el líquido} + \text{masa del níquel en } \alpha$$

$$\therefore 100 \times (\% \text{ de Ni en la aleación}) = [(100)(1 - x)](\% \text{ de Ni en } L) + (100)(x)(\% \text{ de Ni en } \alpha)$$

$$\therefore (\% \text{ de Ni en la aleación}) = (\% \text{ de Ni en } L)(1 - x) + (\% \text{ de Ni en } \alpha)(x)$$

Multiplicando y reacomodando,

$$x = \frac{(\% \text{ de Ni en la aleación}) - (\% \text{ de Ni en } L)}{(\% \text{ de Ni en } \alpha) - (\% \text{ de Ni en } L)}$$

A partir del diagrama de fases a 1250°C :

$$x = \frac{40 - 32}{45 - 32} = \frac{8}{13} = 0.62$$

Si se convierte de fracción en masa a porcentaje en masa, la aleación a 1250°C contiene 62% α y 38% L . Observe que la concentración del Ni en la fase α (a 1250°C) es de 45% y la concentración del níquel en la fase líquida (a 1250°C) es de 32%.

Para calcular las cantidades del líquido y el sólido, se construye una palanca sobre la línea de interconexión, con el fulcro de la palanca en la composición original de la aleación. El brazo de la palanca *opuesto* a la composición de la fase, cuya cantidad se está calculando, se divide entre la longitud total de la palanca para obtener la cantidad de esa fase. En el ejemplo 10-8, observe que el denominador representa la longitud total de la línea de interconexión y el numerador es la porción de la palanca *opuesta* a la composición del sólido que se está tratando de calcular.

La regla de la palanca en general puede escribirse como

$$\text{Porcentaje de la fase} = \frac{\text{brazo opuesto de la palanca}}{\text{longitud total de la línea de interconexión}} \times 100 \quad (10-3)$$

Se puede aplicar la regla de la palanca en cualquier región de dos fases de un diagrama de fases binario. El cálculo de la regla de la palanca no se emplea en regiones con una sola fase debido a que la respuesta es trivial (hay 100% de esa fase presente). La regla de la palanca se emplea para calcular la fracción relativa o % de una fase en una mezcla de dos fases. Los puntos extremos de la línea de interconexión se utilizan para obtener la composición (es decir, la concentración química de los diferentes componentes) de cada fase.

El siguiente ejemplo refuerza la aplicación de la regla de la palanca para calcular las cantidades de las fases para una aleación a distintas temperaturas. Ésta es una manera de mantener un registro del comportamiento de la solidificación de las aleaciones, algo que no se vio en el capítulo 9.

Ejemplo 10-9 Solidificación de una aleación de Cu-40% Ni

Determine la cantidad de cada fase en la aleación de Cu-40% Ni mostrada en la figura 10-12 a 1300 °C, 1270 °C, 1250 °C y 1200 °C.

SOLUCIÓN

- 1300°C: Sólo hay una fase, por lo que es 100% L .
- 1270°C: % de $L = \frac{50 - 40}{50 - 37} \times 100 = 77\%$
 % de $\alpha = \frac{40 - 37}{50 - 37} \times 100 = 23\%$
- 1250°C: % de $L = \frac{45 - 40}{45 - 32} \times 100 = 38\%$
 % de $\alpha = \frac{40 - 32}{45 - 32} \times 100 = 62\%$
- 1200°C: Sólo hay una fase, por lo que es 100% α .

Observe que a cada temperatura, se puede determinar la composición de las fases en equilibrio a partir de los extremos de la línea de interconexión trazada a esa temperatura.

Esto puede parecer un poco extraño al principio. ¿Cómo cambia su composición la fase α ? Esta fase líquida también cambia su composición y las cantidades de cada fase varían con la temperatura a medida que la aleación se enfría del liquidus al solidus.

En algunas ocasiones se desea expresar la composición como porcentaje atómico (%at) en vez de porcentaje en peso (%pe). Para una aleación de Cu-Ni, donde M_{Cu} y M_{Ni} son los pesos moleculares, las siguientes ecuaciones proveen ejemplos para realizar estas conversiones:

$$\%at \text{ de Ni} = \left(\frac{\frac{\%pe \text{ Ni}}{M_{Ni}}}{\frac{\%pe \text{ Ni}}{M_{Ni}} + \frac{\%pe \text{ Cu}}{M_{Cu}}} \right) \times 100 \quad (10-4)$$

$$\%pe \text{ de Ni} = \left(\frac{(\%at \text{ de Ni}) \times (M_{Ni})}{(\%at \text{ de Ni}) \times M_{Ni} + \%at \text{ de Cu} \times M_{Cu}} \right) \times 100 \quad (10-5)$$

10-6 Relación entre las propiedades y el diagrama de fases

Se ha mencionado anteriormente que una aleación de cobre-níquel será más resistente que el cobre puro o que el níquel puro debido al endurecimiento por solución sólida. Las propiedades mecánicas de una serie de aleaciones de cobre-níquel pueden relacionarse con el diagrama de fases como se muestra en la figura 10-14.

La resistencia del cobre aumenta por endurecimiento por solución sólida hasta que se adiciona alrededor de 67% de Ni. El níquel puro es endurecido por solución sólida por la adición de cobre hasta que se adiciona 33% de Cu. Se obtiene la resistencia máxima para una

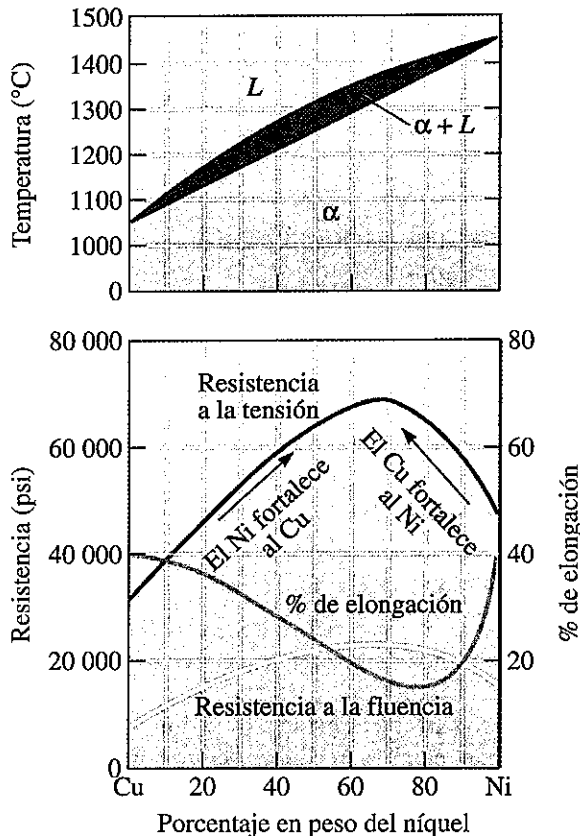


Figura 10-14

Propiedades mecánicas de las aleaciones de cobre-níquel. El cobre es endurecido hasta 67% de Ni y el níquel es endurecido hasta 33% de Cu.

aleación de Cu-67% Ni, conocida como *Monel*. El máximo está más cerca del lado del níquel puro del diagrama de fases debido a que el níquel puro es más resistente que el cobre puro.

Ejemplo 10-10

Diseño de un procedimiento de fusión para una fundición

Se necesita producir una aleación de Cu-Ni que tenga una resistencia a la fluencia (límite elástico) mínima de 20 000 psi, una resistencia a la tensión mínima de 60 000 psi y un porcentaje de elongación mínimo de 20%. Tiene en su inventario una aleación de Cu-20% Ni y níquel puro. Diseñe un método para producir fundiciones que posean las propiedades requeridas.

SOLUCIÓN

A partir de la figura 10-14, se determina la composición requerida de la aleación. Para cumplir la resistencia a la fluencia requerida, la aleación debe contener entre 40 y 90% de Ni; para la resistencia a la tensión, se requiere de 40 a 88% de Ni. El porcentaje de elongación requerido puede obtenerse para aleaciones que contengan menos de 60% de Ni o más de 90% de Ni. Para satisfacer estas condiciones, se podría utilizar Cu-40% a 60% de Ni.

Se prefiere seleccionar un contenido de níquel bajo, dado que el níquel es más costoso que el cobre. Además, las aleaciones con menos níquel tienen un liquidus menor, lo que permite que se produzcan fundidos con menos energía. Por tanto, una aleación razonable es Cu-40% Ni.

Para producir esta composición a partir del inventario de fundido disponible, se debe mezclar un poco del níquel puro con el lingote de Cu-20% Ni. Suponga que se desea producir 10 kg de la aleación. Sea x la masa de la aleación de Cu-20% Ni que se necesitará.

La masa del Ni puro necesaria será $10 - x$. Dado que la aleación final consiste en 40% de Ni, la masa total de Ni necesario será.

$$(10 \text{ kg})\left(\frac{40\% \text{ Ni}}{100\%}\right) = 4 \text{ kg Ni}$$

Ahora se escribe un balance de masa para el níquel. La suma del níquel a partir de la aleación de Cu-20% Ni y el níquel puro debe ser igual al níquel total en la aleación de Cu-40% Ni que se está produciendo.

$$(x \text{ kg})\left(\frac{20\% \text{ Ni}}{100\%}\right) + (10 - x \text{ kg})\left(\frac{100\% \text{ Ni}}{100\%}\right) = 4 \text{ kg Ni}$$

$$0.2x + 10 - x = 4$$

$$6 = 0.8x$$

$$x = 7.5 \text{ kg}$$

Por tanto, se necesita fundir 7.5 kg de Cu-20% Ni con 2.5 kg de níquel puro para producir la aleación requerida. Después se calentaría la aleación por encima de la temperatura de liquidus, la cual es de 1280 °C para la aleación de Cu-40% Ni, antes de verter el metal líquido en un molde apropiado.

Se necesitan realizar tales cálculos para varias situaciones prácticas que traten con el procesamiento de aleaciones debido a que cuando se producen, por lo regular se emplean materiales nuevos y reciclados.

10-7 Solidificación de una aleación de solución sólida

Cuando se funde y se enfría una aleación como la de Cu-40% Ni, la solidificación requiere formación de núcleos y crecimiento. La nucleación heterogénea permite poco o ningún subenfriamiento, por lo que la solidificación comienza cuando el líquido alcanza la temperatura de liquidus (capítulo 9). El diagrama de fases (figura 10-15), con una línea de interconexión trazada a la temperatura de liquidus, indica que *el primer sólido a formarse* tiene una composición de Cu-52% Ni.

Se requieren dos condiciones para el crecimiento del sólido α . Primero, el crecimiento requiere que se elimine el calor latente de fusión (ΔH_f), el cual evoluciona a medida que se solidifica el líquido, de la interfaz sólido-líquido. Segundo, a diferencia del caso de los metales puros, debe ocurrir difusión para que las composiciones de las fases sólida y líquida sigan las curvas de solidus y de liquidus durante el enfriamiento. Se elimina el calor latente de fusión (ΔH_f) en un intervalo de temperaturas para que la curva de enfriamiento muestre un cambio en la pendiente, en vez de una meseta plana (figura 10-16). Por tanto, como se mencionó anteriormente en el capítulo 9, la solidificación de las aleaciones es distinta de la de los metales puros.

Al comienzo de la solidificación, el líquido contiene Cu-40% Ni y el primer sólido contiene Cu-52% Ni. Los átomos de níquel deben haberse difundido y concentrado en el primer sólido a formar. Después del enfriamiento a 1250 °C, la solidificación ha avanzado y el diagrama de fases indica que ahora todo el líquido debe contener 32% de Ni y todo el sólido debe contener 45% de Ni. En el enfriamiento del liquidus a 1250 °C, algunos átomos de níquel deben difundirse del primer sólido al nuevo sólido, reduciendo el níquel en el primer sólido. Los átomos de níquel adicionales se difunden del líquido solidificándose al nuevo sólido. Mientras tanto, los átomos de cobre se han concentrado —por difusión— en el líquido restante. Este proceso debe continuar hasta que se alcance la temperatura de solidus, donde el último líquido a solidificarse, el cual contiene Cu-28% Ni, se solidifica y forma un sólido que contiene Cu-40% Ni. Justo debajo de solidus, todo el sólido debe contener una concentración uniforme de 40% de Ni.

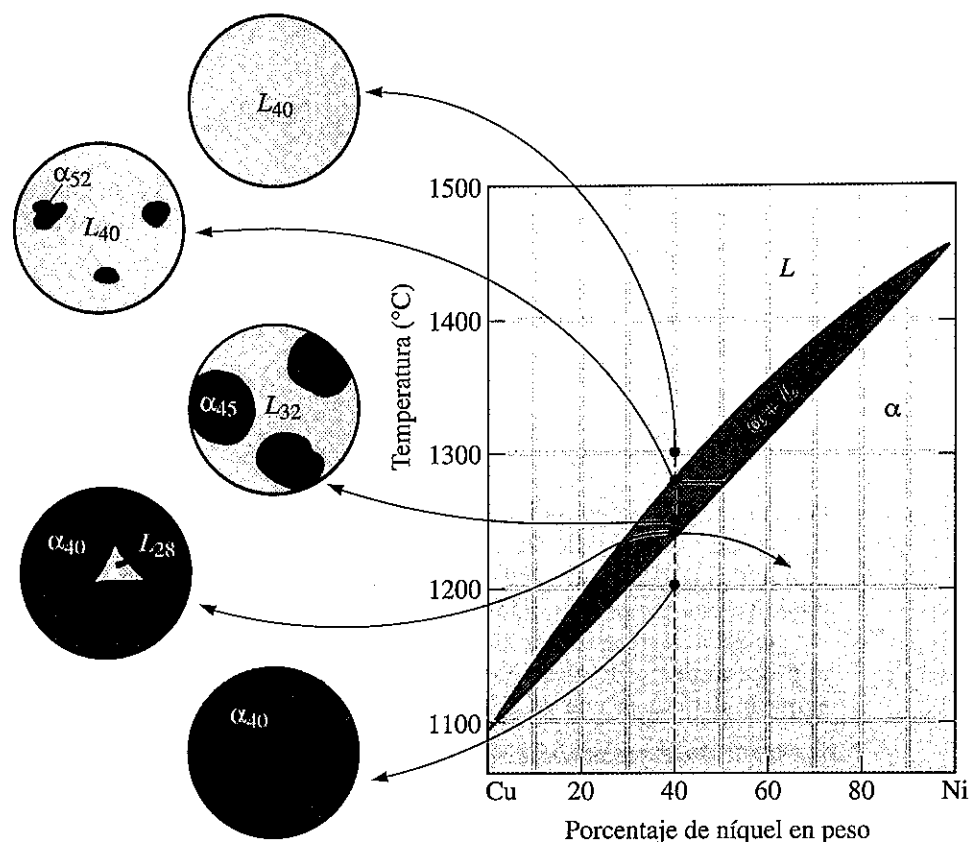


Figura 10-15 Cambio en la estructura de una aleación de Cu-40% Ni durante la solidificación en equilibrio. Los átomos de níquel y cobre deben difundirse durante el enfriamiento para satisfacer el diagrama de fases y producir una estructura uniforme de equilibrio.

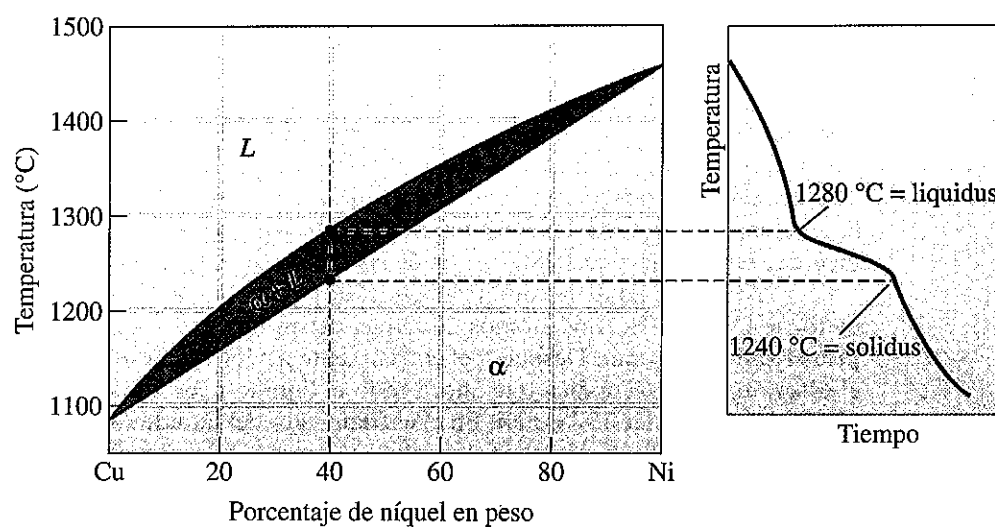


Figura 10-16 Curva de enfriamiento para una aleación isomorfa durante la solidificación. Se supone que las rapidezces de enfriamiento son bajas por lo que se mantiene el equilibrio térmico a cada temperatura. Los cambios en la pendiente de la curva de enfriamiento indican las temperaturas de liquidus y solidus, en este caso para una aleación de Cu-40% Ni.

Para alcanzar esta estructura final en equilibrio, la rapidez de enfriamiento debe ser extremadamente lenta. Debe permitirse el tiempo suficiente para que los átomos de cobre y níquel se difundan y produzcan las composiciones dadas por el diagrama de fases. En muchas situaciones de fundición prácticas, la rapidez de enfriamiento es tan veloz como para permitir el equilibrio. Por tanto, en la mayoría de las fundiciones producidas a partir de aleaciones se espera una segregación química. En el capítulo 9 se vio que la porosidad es un defecto que puede presentarse en muchos productos colados. La **segregación** química es otro defecto que se presenta con frecuencia en los productos colados. Esto se explica a detalle en la siguiente sección.

10-8 Solidificación y segregación sin equilibrio

En el capítulo 5 se examinaron las fuerzas termodinámica y cinética impulsoras para la difusión. Se sabe que la difusión se lleva a cabo en forma más rápida en los gases, seguida por los líquidos y después los sólidos. También se vio que el incremento en la temperatura aumenta las rapidez de difusión. Cuando el enfriamiento es demasiado rápido como para que los átomos se difundan y produzcan las condiciones de equilibrio, se producen estructuras sin equilibrio en la pieza colada. Observe lo que le sucede a la aleación de Cu-40% Ni en el enfriamiento rápido.

De nuevo, el primer sólido, que contiene 52% de Ni, se forma al alcanzar la temperatura de liquidus (figura 10-17). En el enfriamiento a 1260 °C, la línea de interconexión indica

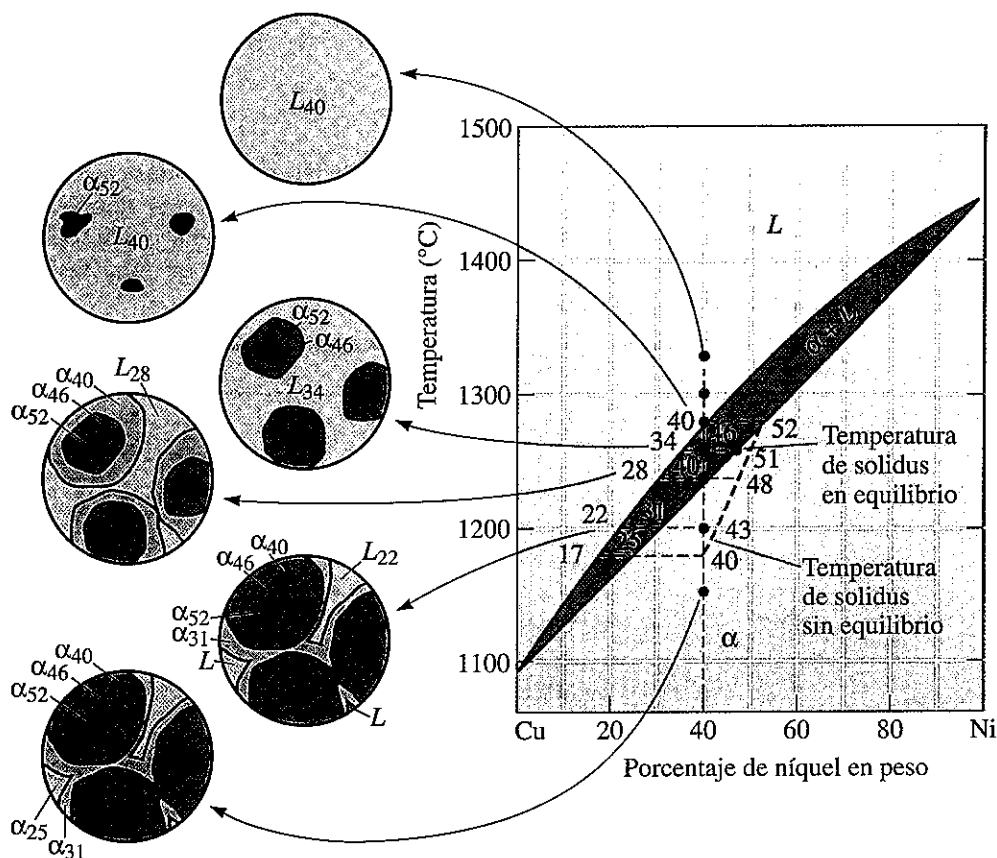


Figura 10-17 Cambio en la estructura de una aleación de Cu-40% Ni durante la solidificación sin equilibrio. El tiempo insuficiente para la difusión en el sólido produce una estructura segregada. Observe la curva de solidus sin equilibrio.

que el líquido contiene 34% de Ni y el sólido que se forma a esa temperatura contiene 46% de Ni. Dado que la difusión se lleva a cabo de manera rápida en los líquidos, se espera que la línea de interconexión pronostique la composición del líquido con precisión; sin embargo, la difusión en los sólidos es lenta de manera comparativa. El primer sólido que se forma sigue teniendo alrededor de 52% de Ni, pero el sólido nuevo sólo contiene 46% de Ni. Se podría encontrar que la composición promedio del sólido es 51% de Ni. Esto da un solidus sin equilibrio distinto del dado por el diagrama de fases. A medida que continúa la solidificación, la línea de solidus sin equilibrio continúa separándose del solidus en equilibrio.

Cuando la temperatura alcanza los 1240 °C (solidus en equilibrio), sigue quedando una cantidad significativa del líquido. El líquido no se solidificará por completo hasta que se enfríe a 1180 °C, donde el solidus sin equilibrio interseca la composición original de 40% de Ni. A esa temperatura el líquido que contiene 17% de Ni se solidifica, lo que da un sólido que contiene 25% de Ni. El último líquido a solidificarse contiene por tanto 17% de Ni y el último sólido a formarse contiene 25% de Ni. La composición promedio del sólido es 40% de Ni, pero la composición no es uniforme.

La localización real de la línea de solidus sin equilibrio y de la temperatura de solidus sin equilibrio final depende de la rapidez de enfriamiento. Las rapidezces de enfriamiento más veloces ocasionan que se aleje más del equilibrio. El siguiente ejemplo ilustra cómo se pueden tomar en cuenta los cambios en la composición en condiciones sin equilibrio.

Ejemplo 10-11

Solidificación sin equilibrio de aleaciones de Cu-Ni

Calcule la composición y la cantidad de cada fase en una aleación de Cu-40% Ni que está presente en las condiciones sin equilibrio mostradas en la figura 10-17 a 1300 °C, 1280 °C, 1260 °C, 1240 °C, 1200 °C y 1150 °C. Compárelas con las composiciones y las cantidades de cada fase en equilibrio.

SOLUCIÓN

Se utiliza la línea de interconexión a la temperatura de solidus en equilibrio en la curva para calcular las composiciones y los porcentajes de las fases conforme a la regla de la palanca. De manera similar, se utiliza la curva de la temperatura de solidus sin equilibrio para calcular los porcentajes y las concentraciones de las distintas fases formadas en las condiciones sin equilibrio.

Temperatura	Equilibrio	Sin equilibrio
1300 °C	L: 40% Ni 100% L	L: 40% Ni 100% L
1280 °C	L: 40% Ni 100% L	L: 40% Ni 100% L
1260 °C	L: 34% Ni $\frac{46 - 40}{46 - 34} = 50\%$ L α : 46% Ni $\frac{40 - 34}{46 - 34} = 50\%$ α	L: 34% Ni $\frac{51 - 40}{51 - 34} = 65\%$ L α : 51% Ni $\frac{40 - 34}{51 - 34} = 35\%$ α
1240 °C	L: 28% Ni ~ 0% L α : 40% Ni 100% α	L: 28% Ni $\frac{48 - 40}{48 - 28} = 40\%$ L α : 48% Ni $\frac{40 - 28}{48 - 28} = 60\%$ α
1200 °C	α : 40% Ni 100% α	L: 22% Ni $\frac{43 - 40}{43 - 22} = 14\%$ L α : 43% Ni $\frac{40 - 22}{43 - 22} = 86\%$ α
1150 °C	α : 40% Ni 100% α	α : 40% Ni 100% α

Microsegregación A la composición no uniforme producida por la solidificación sin equilibrio se le conoce como segregación. La **microsegregación**, también conocida como **segregación interdendrítica** y **segregación central**, ocurre en distancias cortas, con frecuencia entre los pequeños brazos dendríticos. Los centros de las dendritas, los cuales representan el primer sólido que se forma, son ricos en el elemento con el punto de fusión más alto en la aleación. Las regiones entre las dendritas son ricas en el elemento con el punto de fusión más bajo, dado que estas regiones representan el último líquido que se solidifica. La composición y las propiedades de la fase α (en el caso de las aleaciones de Cu-Ni) difieren de una región a otra y se espera que la pieza colada tenga propiedades más deficientes como resultado.

La microsegregación puede ocasionar **fragilidad en caliente**, o fusión del material interdendrítico con el punto de fusión más bajo a temperaturas por debajo de solidus en equilibrio. Cuando se calienta la aleación de Cu-40% Ni a 1225 °C, por debajo de solidus en equilibrio pero por encima del solidus sin equilibrio, las regiones bajas en níquel entre las dendritas se funden.

Homogeneización Se pueden reducir la segregación interdendrítica y los problemas de fragilidad en caliente por medio de un **tratamiento térmico de homogeneización**. Si se calienta la pieza colada a una temperatura por debajo de solidus sin equilibrio, los átomos de níquel en los centros de las dendritas se difunden a las regiones interdendríticas; los átomos de cobre se difunden en la dirección opuesta [figura 10-18a]. Dado que las distancias de difusión son relativamente cortas, sólo se requieren unas cuantas horas para eliminar la mayoría de las diferencias en la composición. El tiempo de homogeneización está relacionado con

$$t = c \frac{(\text{EBDS})^2}{D_s} \quad (10-6)$$

donde EBDS es el espaciado entre brazos dendríticos secundarios, D_s es la rapidez de difusión del soluto en la matriz y c es una constante. Un EBDS pequeño reduce la distancia de difusión y permite tiempos de homogeneización cortos.

Macrosegregación Existe otro tipo de segregación, conocido como **macrosegregación**, la cual ocurre a una distancia mayor, entre la superficie y el centro de la pieza colada, con la superficie (la cual se solidifica primero) con un poco más de la cantidad promedio del metal con el punto de fusión más alto. La macrosegregación no se puede eliminar por medio de un tratamiento de homogeneización, debido a que las distancias de difusión son muy grandes. La macrosegregación puede reducirse por trabajo en caliente, el cual se explicó en el capítulo 8. Esto se debe a que en el trabajo en caliente, básicamente se destruye la macroestructura de colada.

Polvos solidificados rápidamente En las aplicaciones en las que la porosidad, la microsegregación y la macrosegregación deben minimizarse, se preparan polvos de aleaciones complejas utilizando **atomización por rocío** [figura 10-18b]. En la atomización por rocío, se preparan fundidos homogéneos de composiciones complejas y se rocían a través de una boquilla cerámica. El flujo de la fusión se rompe en gotas más finas y se temple de manera rápida utilizando gases argón (Ar) o nitrógeno (N_2) (atomización con gas) o agua (atomización con agua). Las gotas fundidas se solidifican de manera rápida, generando partículas de polvo que van de ~10-100 μm de tamaño. Dado que la solidificación de las gotas ocurre de manera muy rápida, hay muy poco tiempo para la difusión, y por tanto, no ocurre segregación química. Muchas superaleaciones complejas basadas en níquel y cobalto y varios polvos de acero inoxidable son ejemplos de materiales preparados empleando esta técnica. Los polvos atomizados por rocío se mezclan y se moldean en formas deseadas. Las técnicas empleadas en el procesamiento de tales polvos incluyen la sinterización (capítulo 5), el **prensado en caliente** (PC) y el **prensado isostático en caliente** (PIC). En el PIC, se conduce la

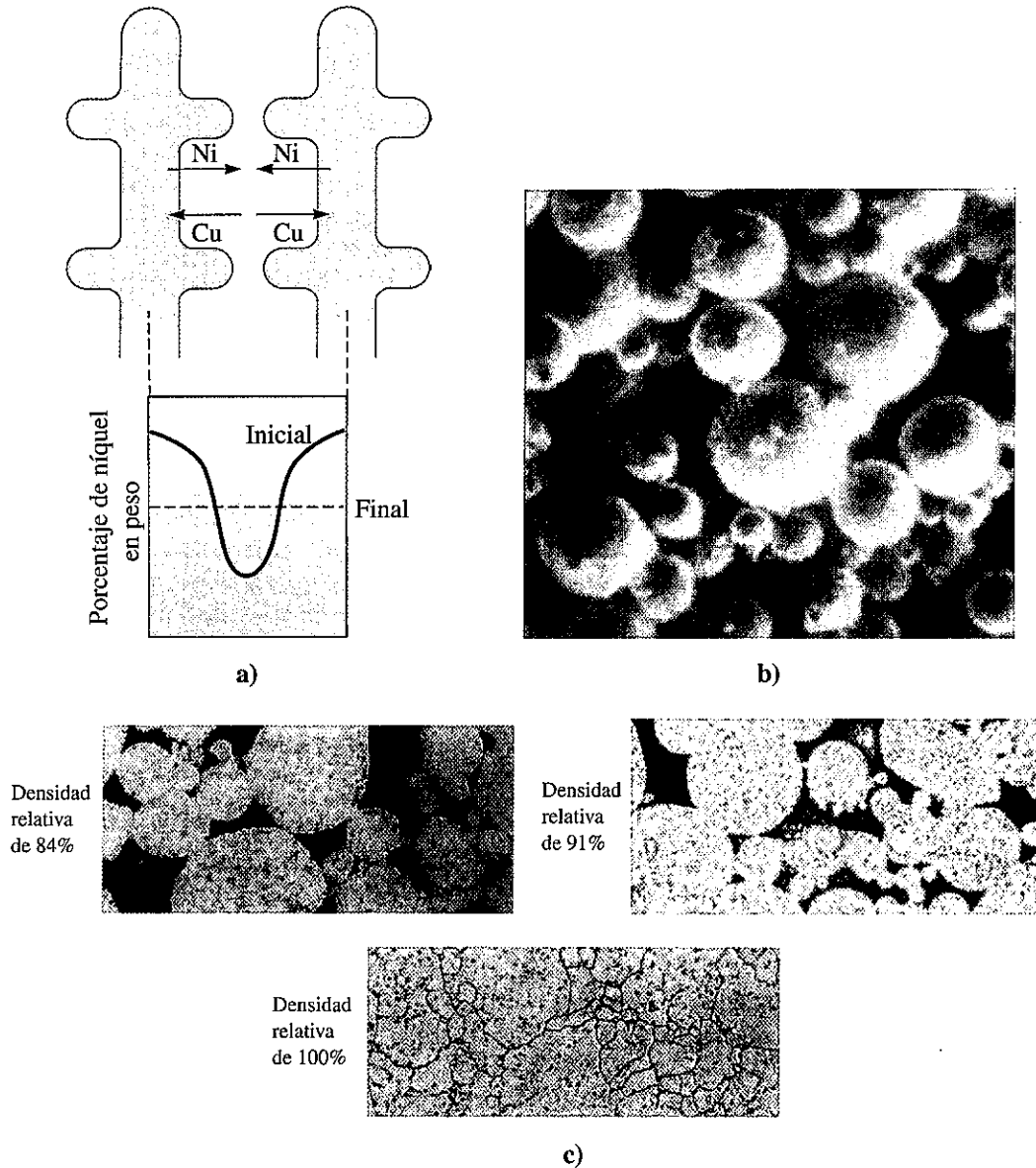


Figura 10-18 a) La microsegregación entre dendritas puede reducirse por medio de un tratamiento térmico de homogeneización. La contradifusión de los átomos de níquel y cobre puede eliminar con el tiempo los gradientes de composición y producir una composición homogénea. b) Polvos de superaleaciones atomizados por rocío. c) Progresión de la densificación en una muestra de Astroalloy al bajo carbono procesada empleando PIC. (Micrografías cortesía de J. Staite, Hann, B. y Rizzo, F., *Crucible Compaction Metals*.)

sinterización bajo una presión isostática ($\sim 25\,000$ psi) utilizando, por ejemplo, gas argón. Pueden procesarse componentes muy grandes (de $\sim$ hasta 2 pies de diámetro, varios pies de largo) y pequeños empleando el PIC. A partir de éstos pueden maquinarse componentes más pequeños como los discos que sujetan los álabes de las turbinas. En la figura 10-18c) se muestra la progresión de la densificación en una muestra de Astroalloy al bajo carbono procesada utilizando polvos atomizados por rocío.

El prensado en caliente es la sinterización bajo una presión uniaxial y se emplea en la producción de componentes más pequeños de materiales que son difíciles de sinterizar de otra manera (capítulo 15). Las técnicas de PIC y de prensado en caliente se emplean para materiales en polvo metálicos y cerámicos.

Resumen

- Una fase es cualquier porción, incluyendo el todo, de un sistema que es físicamente homogéneo en su interior y está delimitada por una superficie que la separa de cualquier otra porción.
- Un diagrama de fases por lo regular muestra las fases que se espera estén presentes en un sistema en condiciones de equilibrio termodinámico. En ocasiones también pueden mostrarse fases metaestables.
- Se forman soluciones sólidas en los materiales metálicos o cerámicos cuando elementos o compuestos con estructuras cristalinas similares forman una sola fase que es químicamente homogénea.
- El endurecimiento por solución sólida se lleva a cabo en los materiales metálicos por medio de la formación de soluciones sólidas. Los defectos de punto creados restringen el movimiento de las dislocaciones y ocasionan el endurecimiento.
- El grado de endurecimiento por solución sólida aumenta cuando 1) la cantidad del elemento de aleación aumenta y 2) la diferencia en tamaño atómico entre el material anfitrión y el elemento de aleación aumenta.
- La cantidad del elemento (o compuesto) de aleación que puede adicionarse para producir endurecimiento por solución sólida está limitada por la solubilidad del elemento o compuesto de aleación en el material anfitrión. La solubilidad es limitada cuando 1) la diferencia en tamaño atómico es mayor de alrededor del 15%, 2) el elemento (o compuesto) de aleación tiene una estructura cristalina distinta de la del elemento (o compuesto) anfitrión y 3) la valencia y la electronegatividad del elemento o iones constituyentes de aleación son distintas de las del elemento (o compuesto) anfitrión.
- Además de incrementar la resistencia y la dureza, el endurecimiento por solución sólida por lo regular disminuye la ductilidad y la conductividad eléctrica de los materiales metálicos. Una función importante del endurecimiento por solución sólida es proveerle a la aleación buenas propiedades a temperaturas altas.
- Al diagrama de fases en el que los constituyentes exhiben una solubilidad sólida completa se le conoce como diagrama de fases isomorfo.
- Como resultado de la formación de soluciones sólidas, la solidificación comienza a la temperatura de liquidus y se completa a la temperatura de solidus; la diferencia en temperatura sobre la cual ocurre la solidificación es el intervalo de solidificación.
- En las regiones de dos fases del diagrama de fases, los extremos de una línea de interconexión fijan la composición de cada fase y la regla de la palanca permite calcular la cantidad de cada fase.
- La microsegregación y macrosegregación se llevan a cabo durante la solidificación. La microsegregación, o segregación central, ocurre en distancias pequeñas, con frecuencia entre dendritas. Los centros de las dendritas son ricos en el elemento con el punto de fusión más alto, mientras que las regiones dendríticas, las cuales se solidifican al último, son ricas en el elemento con el punto de fusión más bajo.
- La homogeneización puede reducir la microsegregación.
- La macrosegregación describe las diferencias en composición a grandes distancias, como las que existen entre la superficie y el centro de una pieza colada. El trabajo en caliente puede reducir la macrosegregación.

Glosario

Aleación Material conformado por múltiples elementos que exhibe propiedades de un material metálico.

Aleación de una sola fase Aleación que consiste en una fase.

Aleación multifase Aleación que consiste en dos o más fases.

Atomización por rocío Proceso en el que se rocían aleaciones o metales fundidos utilizando una boquilla cerámica. El flujo del material fundido se rompe utilizando un gas (por ejemplo, Ar, N₂) o agua. Esto conduce a gotas más finas que se solidifican de manera rápida, formando polvos del metal o de la aleación con un intervalo de tamaño de partícula de ~10-100 μm .

Copolímero Polímero que se forma combinando dos o más tipos distintos de monómeros, por lo general con la idea de mezclar las propiedades afiliadas con los polímeros individuales.

Diagramas de fases Diagramas que muestran las fases presentes en condiciones de equilibrio y las composiciones de las fases en cada combinación de temperatura y la composición general. En algunas ocasiones los diagramas de fases también indican fases metaestables.

Diagrama de fases binario Diagrama de fases para un sistema con dos componentes.

Diagrama de fases isomorfo Diagrama de fases en el que los componentes muestran solubilidad sólida ilimitada.

Diagrama de fases unario Diagrama de fases en que sólo hay un componente.

Diagrama de P-T Diagrama que describe la estabilidad termodinámica de las fases en distintas condiciones de temperatura y presión (lo mismo que un diagrama de fases unario).

Endurecimiento por dispersión Endurecimiento, por lo regular empleado en materiales metálicos, por medio de la formación de dispersiones ultrafinas de una segunda fase. La interfaz entre la fase recién formada y la fase precursora provee una resistencia adicional al movimiento de las dislocaciones, por tanto ocasiona el endurecimiento de los materiales metálicos (capítulo 11).

Endurecimiento por solución sólida Incremento en la resistencia de un material metálico por medio de la formación de una solución sólida.

Fase Cualquier porción, incluyendo el todo de un sistema, que es físicamente homogénea en su interior y está delimitada por una superficie por lo que está separada de cualquier otra porción.

Fragilidad en caliente Fundición del material sin equilibrio con el punto de fusión más bajo que se forma debido a la segregación, aun cuando la temperatura esté por debajo de la temperatura de solidus en equilibrio.

Intervalo de solidificación Diferencia en temperatura entre las temperaturas de liquidus y de solidus.

Línea de interconexión Línea horizontal trazada en una región de dos fases de un diagrama de fases para asistir en la determinación de las composiciones de las dos fases.

Liquidus Curvas en los diagramas de fases que describen las temperaturas de liquidus de todas las aleaciones posibles.

Macrosegregación Presencia de diferencias en composición en un material a grandes distancias ocasionadas por la solidificación sin equilibrio. La única manera de eliminar este tipo de segregación es destruyendo la estructura colada por medio de trabajo en caliente.

Microsegregación Véase Segregación central.

Prensado en caliente (PC) Sinterización de polvos metálicos o cerámicos bajo una presión uniaxial; empleada para la producción de componentes más pequeños de materiales que son difíciles de sinterizar de otra manera.

Prensado isostático en caliente (PIC) Sinterización de polvos cerámicos o metálicos, conducida bajo una presión isostática.

Punto triple Presión y temperatura a las que están en equilibrio las tres fases de un solo material.

Regla de la palanca Técnica para determinar la cantidad de cada fase en un sistema de dos fases.

Regla de las fases Véase Regla de las fases de Gibbs.

Regla de las fases de Gibbs Describe el número de grados de libertad o el número de variables que deben fijarse para especificar la temperatura y la composición de una fase ($2 + C = F + P$, donde la presión y la temperatura pueden variar, $1 + C = F + P$, donde la presión o la temperatura es constante).

Reglas de Hume-Rothery Condiciones que deben satisfacer un sistema de aleación o cerámico para que el sistema tenga solubilidad sólida ilimitada. Las reglas de Hume-Rothery son necesarias pero no suficientes para que los materiales muestren solubilidad sólida ilimitada.

Segregación Presencia de diferencias en composición en un material, con frecuencia ocasionadas por un tiempo insuficiente para la difusión durante la solidificación.

Segregación central Segregación química en productos colados, también conocida como microsegregación o segregación interdendrítica. Los centros de las dendritas son ricos en el elemento con el punto de fusión más alto, mientras que las regiones interdendríticas, las cuales se solidifican al último, son ricas en el elemento con el punto de fusión más bajo.

Segregación interdendrítica Véase Segregación central.

Solidus Curvas en los diagramas de fases que describen las temperaturas de solidus de todas las aleaciones posibles.

Solubilidad Cantidad de un material que se disolverá por completo en un segundo material sin crear una segunda fase.

Solubilidad ilimitada Cuando la cantidad de un material que se disolverá en un segundo material sin crear una segunda fase es ilimitada.

Solubilidad limitada Cuando sólo puede disolverse cierta cantidad de un material soluto en un material disolvente.

Solución sólida Fase sólida formada por la combinación de múltiples elementos o compuestos de tal manera que la fase general tiene una composición uniforme y propiedades que son diferentes de las de los elementos o compuestos que la conforman.

Temperatura de liquidus Temperatura a la que comienza a formarse el primer sólido durante la solidificación.

Temperatura de solidus Temperatura por debajo de la cual todo el líquido se ha solidificado por completo.

Tratamiento térmico de homogeneización Tratamiento térmico empleado para reducir la microsegregación ocasionada durante la solidificación sin equilibrio. Este tratamiento térmico no puede eliminar la macrosegregación.

Problemas

- 10-1** Explique el principio del endurecimiento por tamaño de los granos. ¿Este mecanismo funciona a temperaturas altas? Explique por qué.
- 10-2** Explique el principio de endurecimiento por deformación. ¿Este mecanismo funciona a temperaturas altas? Explique por qué.
- 10-3** ¿Cuál es el principio del endurecimiento por solución sólida? ¿Este mecanismo funciona a temperaturas altas? Explique por qué.
- 10-4** ¿Cuál es el principio del endurecimiento por dispersión?

Sección 10-1 Fases y diagrama de fases

- 10-5** ¿A qué se refiere el término "fase"?
- 10-6** ¿Cuáles son las distintas fases del agua?
- 10-7** Se ha sabido que el hielo existe en distintos polimorfos. ¿Son éstas distintas fases del agua?
- 10-8** Escriba la regla de las fases de Gibbs, suponiendo que se permite que la temperatura y la presión varíen. Explique con claridad el significado de cada término.
- 10-9** ¿Qué es un diagrama de fases?
- 10-10** En la figura 10-19 se muestra el diagrama de fases unario para el SiO_2 . Localice el punto triple donde coexisten el sólido, el líquido y el vapor y dé la temperatura y el tipo de sólido presente. ¿Qué indican los demás puntos "triples"?

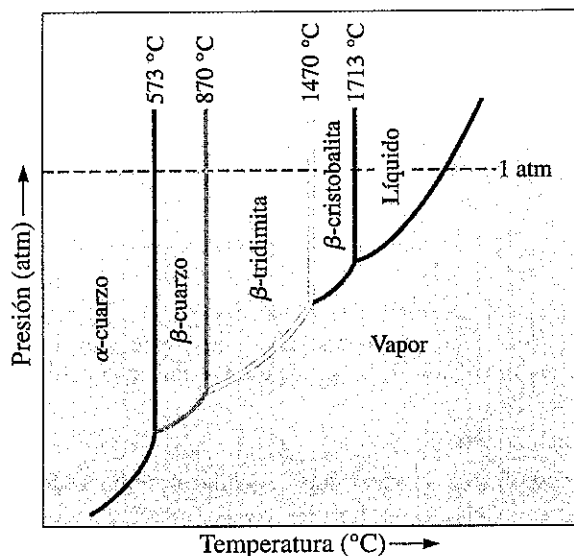


Figura 10-19 Diagrama de presión-temperatura para el SiO_2 . La línea discontinua muestra una atmósfera de presión. (Para el problema 10-10.)

10-11 La figura 10-20 muestra el diagrama de fases unario para el carbono. Con base en este diagrama, ¿en qué condiciones puede con-

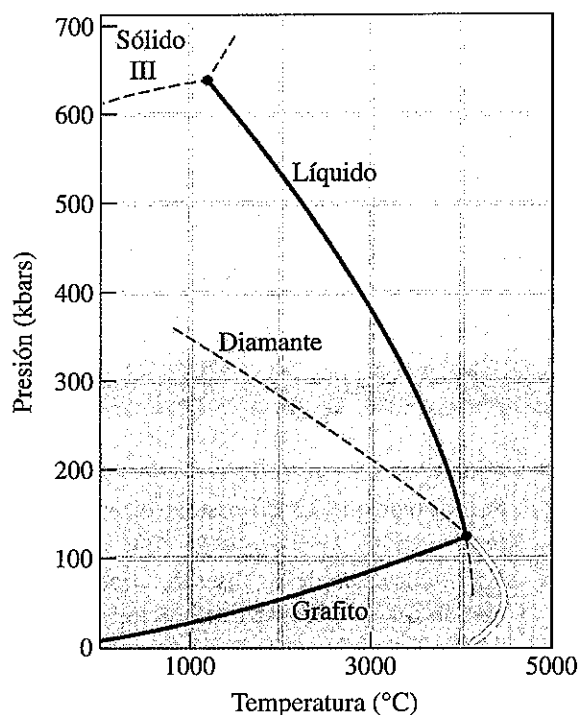


Figura 10-20 Diagrama de fases unario para el carbono. La región para la formación del diamante se muestra con una línea discontinua (para el problema 10-11). (Adaptada de *Introduction to Phase Equilibria*, por C. G. Bergeron y S. H. Risbud, figura 2-11. Copyright © 1984 American Ceramic Society. Adaptada con permiso.)

vertirse en diamante el carbono que está en forma de grafito?

10-12 El diamante natural se forma a aproximadamente 120 a 200 km debajo de la superficie de la Tierra en condiciones de presión y temperaturas altas. Suponiendo que la densidad promedio de la Tierra es de 5500 kg/m^3 , utilice esta información y el diagrama de fases unario para C (figura 10-20) para calcular el intervalo del gradiente geotérmico de la Tierra (rapidez a la que incrementa la temperatura con la profundidad). Calcule la presión debajo de la superficie de la Tierra como ρgh , donde ρ es la densidad, g es la gravedad y h es la profundidad. Observe que $10 \text{ kbar} = 10^9 \text{ Pa}$.

Sección 10-2 Solubilidad y soluciones sólidas

10-13 ¿Qué es una solución sólida?

10-14 ¿Cómo pueden formarse soluciones sólidas en los sistemas cerámicos?

10-15 ¿Se necesita una solubilidad sólida del 100% para formar una solución sólida de un material en otro?

10-16 Se adicionan concentraciones pequeñas de zirconato de plomo (PbZrO_3) a titanato de plomo (PbTiO_3). Dibuje un esquema de la estructura cristalina de solución sólida resultante que se espera que se forme. Este material, conocido como titanato de zirconio y plomo (mejor conocido como PZT) tiene varias aplicaciones que van de bujías a imágenes ultrasónicas. Vea la sección 3-7 para la información sobre la estructura cristalina de la perovskita.

10-17 ¿Pueden formarse soluciones sólidas entre tres elementos o tres compuestos?

10-18 ¿Qué es un copolímero? ¿Cuál es la ventaja de la formación de copolímeros?

10-19 ¿La formación de copolímeros es similar a la formación de soluciones sólidas?

10-20 ¿Qué es el copolímero ABS? Enuncie algunas de las aplicaciones de este material.

Sección 10-3 Condiciones para la solubilidad sólida ilimitada

10-21 Enuncie de manera breve las reglas de Hume-Rothery y explique su significado.

10-22 ¿Pueden aplicarse las reglas de Hume-Rothery a los sistemas cerámicos? Explique por qué.

10-23 Con base en las condiciones de Hume-Rothery, ¿cuáles de los siguientes sistemas se esperaría que muestren solubilidad sólida ilimitada?

Explique por qué. a) Au-Ag; b) Al-Cu; c) Al-Au; d) U-W; e) Mo-Ta; f) Nb-W; g) Mg-Zn y h) Mg-Cd.

- 10-24** Identifique cuáles de los siguientes óxidos es probable que exhiban una solubilidad sólida del 100% cuando se adicionan al BaTiO_3 : a) SrTiO_3 ; b) CaTiO_3 ; c) ZnTiO_3 , y d) BaZrO_3 . Todos estos óxidos poseen la estructura cristalina de la perovskita.

Sección 10-4 Endurecimiento por solución sólida

- 10-25** Suponga que se añade un %at de 1 de los siguientes elementos al cobre (formando una aleación por separado con cada elemento) sin exceder el límite de solubilidad. ¿Cuál esperaría que dé la aleación con mayor resistencia? ¿Se espera que algunos de los elementos de aleación tengan solubilidad sólida ilimitada en el cobre? a) Au; b) Mn; c) Sr; d) Si, y e) Co.

- 10-26** Suponga que se añade un %at de 1 de los siguientes elementos al aluminio (formando una aleación por separado con cada elemento) sin exceder el límite de solubilidad. ¿Cuál esperaría que dé la menor reducción en la conductividad eléctrica? ¿Se espera que algunos de los elementos de aleación tengan solubilidad sólida ilimitada en el aluminio? a) Li; b) Ba; c) Be; d) Cd, y e) Ga.

- 10-27** ¿Cuál de los siguientes óxidos se espera que tenga la mayor solubilidad sólida en el Al_2O_3 ? a) Y_2O_3 ; b) Cr_2O_3 , y c) Fe_2O_3 .

- 10-28** ¿Cuál es la función de las concentraciones pequeñas de Mg en las aleaciones de aluminio utilizadas para fabricar latas para bebidas?

- 10-29** ¿Por qué los joyeros adicionan pequeñas cantidades de cobre al oro y a la plata?

- 10-30** ¿Por qué no es una buena idea emplear el endurecimiento por solución sólida como mecanismo para incrementar la resistencia del cobre en aplicaciones eléctricas?

- 10-31** Determine los grados de libertad en las siguientes condiciones:

- a) Tl-%pe de 20 Pb a 325 °C y 400 °C;
b) Tl-%pe de 40 Pb a 325 °C y 400 °C;
c) Tl-%pe de 90 Pb a 325 °C y 400 °C.

Refiérase al diagrama de fases en la figura 10-9d).

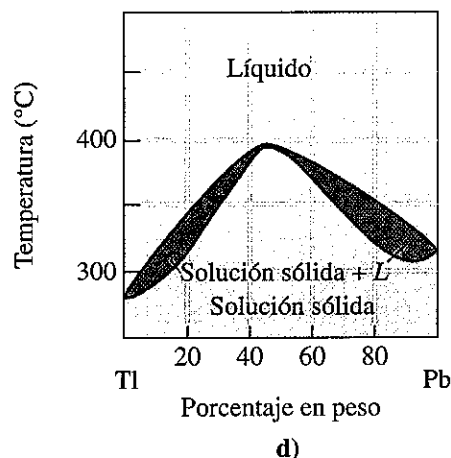


Figura 10-9d) (Repetida para los problemas 10-31 y 10-32.) Diagramas de fases de Ti-Pb.

Sección 10-5 Diagramas de fases isomorfos

- 10-32** Determine el intervalo de composiciones en el que la aleación de Tl-Pb a 350 °C es a) líquida por completo; b) sólida por completo, y c) parcialmente líquida y parcialmente sólida.

Refiérase a la figura 10-9d) para el diagrama de fases de Tl-Pb. Además, determine la cantidad de solución líquida y sólida para Tl-%pe de 25 Pb y Tl-%pe de 75 Pb a 350 °C y también el %pe de Pb en la solución líquida y sólida para ambas composiciones de la aleación.

- 10-33** Determine la temperatura de liquidus, la temperatura de solidus y el intervalo de solidificación para las siguientes composiciones cerámicas de NiO-MgO: a) NiO-%mol de 30 MgO; b) NiO-%mol de 45 MgO; c) NiO-%mol de 60 MgO, y d) NiO-%mol de 85 MgO. [Véase la figura 10-9b).]

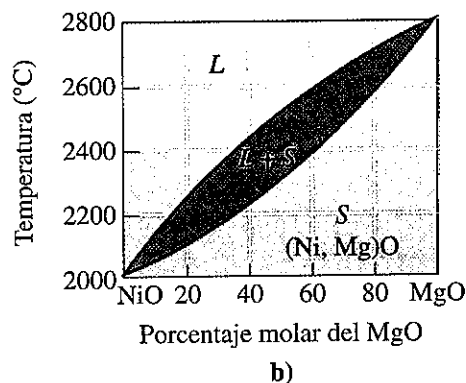


Figura 10-9b) (Repetida para los problemas 10-33, 10-35, 10-38, 10-42, 10-43 y 10-45.) Diagramas de fases de equilibrio para el sistema NiO-MgO.

10-34 Determine la temperatura de liquidus, la temperatura de solidus y el intervalo de solidificación para las siguientes composiciones cerámicas de MgO-FeO:

- MgO-%pe de 25 FeO;
- MgO-%pe de 45 FeO;
- MgO-%pe de 65 FeO, y
- MgO-%pe de 80 FeO.

(Véase la figura 10-21.)

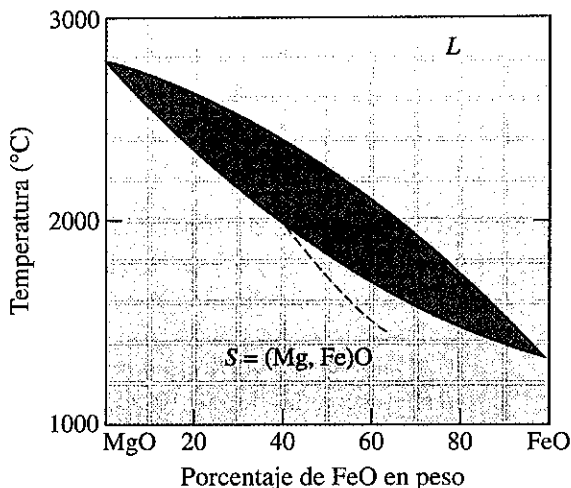


Figura 10-21 Diagrama de fases de equilibrio para el sistema de MgO-FeO. La curva discontinua muestra el solidus sin equilibrio. (Para los problemas 10-34, 10-36, 10-44, 10-45, 10-53, 10-57 y 10-63.)

10-35 Determine las fases presentes, las composiciones de cada fase y la cantidad de cada fase en %mol para las siguientes cerámicas de NiO-MgO a 2400 °C: a) NiO-%mol de 30 MgO; b) NiO-%mol de 45 MgO; c) NiO-%mol de 60 MgO, y d) NiO-%mol de 85 MgO. [Véase la figura 10-9b).]

10-36 Determine las fases presentes, las composiciones de cada fase y la cantidad de cada fase en %pe para las siguientes cerámicas de MgO-FeO a 2000 °C: i) MgO-%pe de 25 FeO; ii) MgO-%pe de 45 FeO; iii) MgO-%pe de 60 FeO, y iv) MgO-%pe de 80 FeO. (Véase la figura 10-21.)

10-37 Considere una cerámica compuesta de un %mol de 30 MgO y un %mol de 70 FeO. Calcule la composición de la cerámica en %pe.

10-38 Se calienta a 2200 °C una cerámica de NiO-%mol de 20 MgO. Determine a) la composición de las fases sólida y líquida en %mol y %pe; b) la cantidad de cada fase en %mol y

%pe, y c) suponiendo que la densidad del sólido es de 6.32 g/cm³ y que la del líquido es de 7.14 g/cm³, determine la cantidad de cada fase en %vol. [Véase la figura 10-9b).]

10-39 Se calienta a 2800 °C una aleación de Nb-%pe de 60 W. Determine a) la composición de las fases sólida y líquida en %pe y %at; b) la cantidad de cada fase en %pe y %at, y c) suponiendo que la densidad del sólido es de 16.05 g/cm³ y que la del líquido es de 13.91 g/cm³, determine la cantidad de cada fase en %vol. (Véase la figura 10-22.)

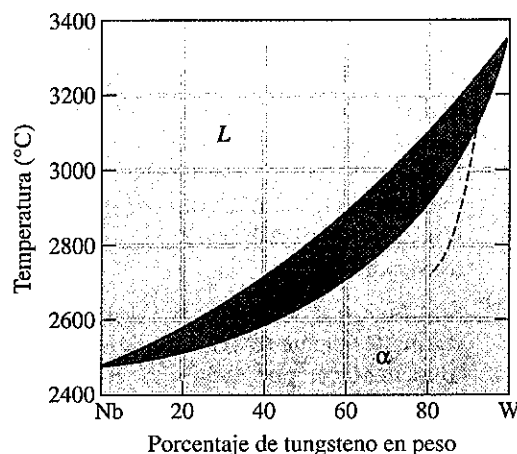


Figura 10-22 Diagrama de fases de equilibrio para el sistema de Nb-W. La curva discontinua representa el solidus sin equilibrio. (Repetida para los problemas 10-39, 10-46, 10-47, 10-48, 10-49, 10-54, 10-56, 10-59 y 10-64.)

10-40 ¿Cuántos gramos de níquel deben adicionarse a 500 gramos de cobre para producir una aleación que tenga una temperatura de liquidus de 1350 °C? ¿Cuál es la razón del número de átomos de níquel a átomos de cobre en esta aleación? [Véase la figura 10-9a).]

10-41 ¿Cuántos gramos de níquel deben adicionarse a 500 gramos de cobre para producir una aleación que contenga un %pe de 50 α a 1300 °C? [Véase la figura 10-9a).]

10-42 ¿Cuántos gramos de MgO deben adicionarse a 1 kg de NiO para producir una cerámica que tenga una temperatura de solidus de 2200 °C? [Véase la figura 10-9b).]

10-43 ¿Cuántos gramos de MgO deben adicionarse a 1 kg de NiO para producir una cerámica que contenga un %mol de 25 del sólido a 2400 °C? [Véase la figura 10-9b).]

10-44 Se desea producir una cerámica sólida de MgO-FeO que contenga porcentajes molares iguales de MgO y FeO a 1200 °C.

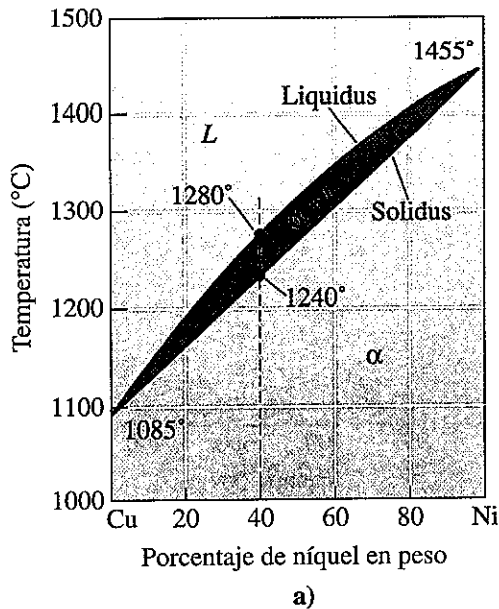


Figura 10-9a) (Repetida para los problemas 10-40 y 10-41.)

Determine el %pe de FeO en la cerámica. (Véase la figura 10-21.)

10-45 Se desea producir una cerámica de MgO-FeO con %pe de 30 del sólido a 2000 °C. Determine la composición de la cerámica en %pe. (Véase la figura 10-21.)

10-46 Una aleación de Nb-W mantenida a 2800 °C es parcialmente líquida y parcialmente sólida. a) Si es posible, determine la composición de cada fase en la aleación y b) si es posible, determine la cantidad de cada fase en la aleación. (Véase la figura 10-22.)

10-47 Una aleación de Nb-W contiene 55% α a 2600 °C. Determine a) la composición de cada fase y b) la composición de la aleación. (Véase la figura 10-22.)

10-48 Suponga que un baño con 1200 lb de una aleación de Nb-%pe de 40 W se mantiene a 2800 °C. ¿Cuántas libras de tungsteno pueden adicionarse al baño antes de que se forme algún sólido? ¿Cuántas libras de tungsteno deben adicionarse para ocasionar que todo el baño sea sólido? (Véase la figura 10-22.)

10-49 Se produce un material compuesto reforzado con fibras, en el que fibras de tungsteno están insertadas en una matriz de Nb. El compuesto está conformado por un %vol de 70 tungsteno. a) Calcule el %pe de fibras de tungsteno en el compuesto y b) suponga que el compuesto se calienta a 2600 °C y se mantiene por varios años. ¿Qué le sucede a las fibras? Explique por qué. (Véase la figura 10-22.)

10-50 Suponga que se utiliza un crisol hecho de níquel puro para contener 500 g de cobre líquido a 1150 °C. Describa qué le sucede al sistema a medida que se mantiene a esta temperatura por varias horas. Explique por qué. [Véase la figura 10-9a).]

Sección 10-6 Relación entre las propiedades y el diagrama de fases

10-51 ¿Qué es el latón? Explique qué elemento endurece la matriz en esta aleación.

10-52 ¿Cuál es la composición de la aleación Monel?

Sección 10-7 Solidificación de una aleación de solución sólida

10-53 Se combinan y se funden moles iguales de MgO y FeO. Determine a) la temperatura de liquidus, la temperatura de solidus y el intervalo de solidificación de la cerámica y b) determine la(s) fase(s) presente(s), su(s) composición(es) y su(s) cantidad(es) a 1800 °C. (Véase la figura 10-21.)

10-54 Suponga que se combinan y se fusionan 75 cm³ de Nb y 45 cm³ de W. Determine a) la temperatura de liquidus, la temperatura de solidus y el intervalo de solidificación de la aleación y b) determine la(s) fase(s) presente(s), su(s) composición(es) y su(s) cantidad(es) a 2800 °C. (Véase la figura 10-22.)

10-55 Se permite que se solidifique una cerámica de NiO-%mol de 60 MgO. Determine a) la composición del primer sólido a formarse y b) la composición del último líquido a solidificarse en condiciones de equilibrio. [Véase la figura 10-9b).]

10-56 Se permite que se solidifique una aleación de Nb-35% W. Determine a) la composición del primer sólido a formarse y b) la composición del último líquido a solidificarse en condiciones de equilibrio. (Véase la figura 10-22.)

10-57 Para condiciones de equilibrio y una cerámica de MgO-%pe de 65 FeO, determine a) la temperatura de liquidus; b) la temperatura de solidus; c) el intervalo de solidificación; d) la composición del primer sólido a formarse durante la solidificación; e) la composición del último líquido a solidificarse; f) la(s) fase(s) presente(s), la(s) composición(es) de la(s) fase(s) y la cantidad de la(s) fase(s) a 1800 °C, y g) la(s) fase(s) presente(s), la(s) composición(es) de la(s) fase(s) y la cantidad de la(s) fase(s) a 1600 °C. (Véase la figura 10-21.)

10-58 La figura 10-23 muestra la curva de enfriamiento para una cerámica de NiO-MgO. Determine a) la temperatura de liquidus; b) la temperatura de solidus; c) el intervalo de solidificación; d) la temperatura del vertido; e) el sobrecalentamiento; f) el tiempo de solidificación local; g) el tiempo de solidificación total, y h) la composición de la cerámica.

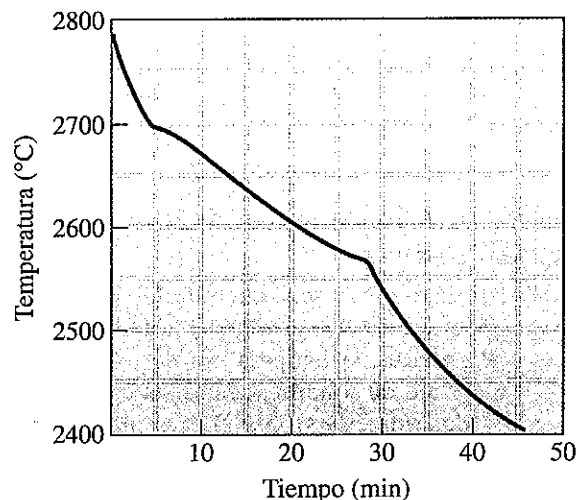


Figura 10-23 Curva de enfriamiento para una cerámica de NiO-MgO (para el problema 10-58).

10-59 Para condiciones de equilibrio y una aleación de Nb-%pe de 80 W, determine a) la temperatura de liquidus; b) la temperatura de solidus; c) el intervalo de solidificación; d) la composición del primer sólido a formarse durante la solidificación; e) la composición del último líquido a solidificarse; f) la(s) fase(s) presente(s), la(s) composición(es) de la(s) fase(s) y la cantidad de la(s) fase(s) a 3000 °C, y g) la(s) fase(s) presente(s), la(s) composición(es) de la(s) fase(s) y la cantidad de la(s) fase(s) a 2800 °C. (Véase la figura 10-22.)

10-60 La figura 10-24 muestra la curva de enfriamiento para una aleación de Nb-W. Determine a) la temperatura de liquidus; b) la temperatura de solidus; c) el intervalo de solidificación; d) la temperatura del vertido; e) el sobrecalentamiento; f) el tiempo de solidificación local; g) el tiempo de solidificación total, y h) la composición de la aleación.

10-61 En la figura 10-25 se muestran las curvas de enfriamiento para varias aleaciones de Mo-V. Con base en estas curvas, trace el diagrama de fases de Mo-V.

Sección 10-8 Solidificación y segregación sin equilibrio

10-62 ¿Cuáles son las causas de la segregación química en los productos colados?

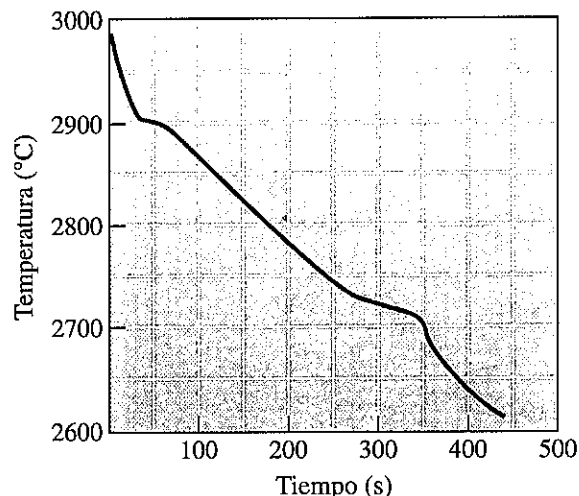


Figura 10-24 Curva de enfriamiento para una aleación de Nb-W (para el problema 10-60).

10-63 Para las condiciones sin equilibrio mostradas para la cerámica de MgO-%pe de 65 FeO, determine a) la temperatura de liquidus; b) la temperatura de solidus sin equilibrio; c) el intervalo de solidificación; d) la composición del primer sólido a formarse durante la solidificación; e) la composición del último líquido a solidificarse; f) la(s) fase(s) presente(s), la(s) composición(es) de la(s) fase(s) y la cantidad de la(s) fase(s) a 1800 °C, y g) la(s) fase(s) presente(s), la(s) composición(es) de la(s) fase(s) y la cantidad de la(s) fase(s) a 1600 °C. (Véase la figura 10-21.)

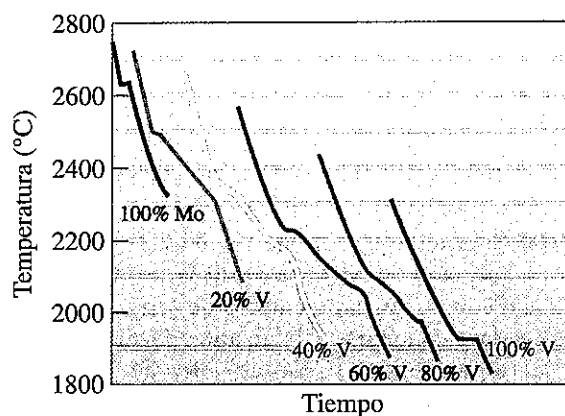


Figura 10-25 Curvas de enfriamiento para una serie de aleaciones de Mo-V (para el problema 10-61).

10-64 Para las condiciones sin equilibrio mostradas para la aleación de Nb-%pe de 80 W, determine a) la temperatura de liquidus; b) la temperatura de solidus sin equilibrio; c) el intervalo de solidificación; d) la composición del primer sólido a formarse durante la solidificación; e) la composición del último líquido a solidificarse; f) la(s) fase(s) presente(s), la(s)

composición(es) de la(s) fase(s) y la cantidad de la(s) fase(s) a 3000 °C, y g) la(s) fase(s) presente(s), la(s) composición(es) de la(s) fase(s) y la cantidad de la(s) fase(s) a 2800 °C. (Véase la figura 10-22.)

- 10-65** ¿Cómo puede eliminarse la microsegregación?
- 10-66** ¿Qué es la macrosegregación? ¿Existe alguna manera de eliminarla sin destruir la estructura colada?
- 10-67** ¿Qué es la homogeneización? ¿Qué tipo de segregación puede eliminar?
- 10-68** Una aleación de cobre-níquel que se solidifica con un espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios (EBDS) de 0.001 cm requiere 15 horas de un tratamiento térmico de homogeneización a 1100 °C. ¿Cuál es el tiempo de homogeneización requerido para la misma aleación con un EBDS de 0.01 cm y de 0.0001 cm? Si el coeficiente de difusión del Ni en Cu a 1100 °C es de $3 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$, calcule la constante c en la ecuación del tiempo de homogeneización. ¿Qué suposición se realiza en este cálculo?
- 10-69** ¿Qué es la atomización por rocío? ¿Puede emplearse para fabricar polvos cerámicos?
- 10-70** Suponga que se le pide que fabrique un componente crítico con base en una superaleación basada en níquel. El componente no debe contener ninguna porosidad y debe ser químicamente homogéneo. ¿Qué proceso de fabricación emplearía para esta aplicación? ¿Por qué?
- 10-71** ¿Qué es el prensado en caliente? ¿En qué difiere del prensado isostático en caliente?

Problemas de diseño

- 10-72** La homogeneización de una aleación de Cu-Ni enfriada de manera lenta que tiene un espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios (EBDS) de 0.025 cm requiere 8 horas a 1000 °C. Diseñe un proceso para producir una estructura homogénea en una aleación de Cu-Ni enfriada de manera más rápida que tenga un EBDS de 0.005 cm.
- 10-73** Diseñe un proceso para producir un refractario de NiO-60% MgO con una estructura que sea 40% de una fase vítrea a temperatura ambiente. Incluya todas las temperaturas relevantes.
- 10-74** Diseñe un método por medio del cual puedan mezclarse y distribuirse de manera uniforme

perlas de vidrio (que tienen una densidad de 2.3 g/cm^3) en una aleación de Cu-20% Ni (con una densidad de 8.91 g/cm^3).

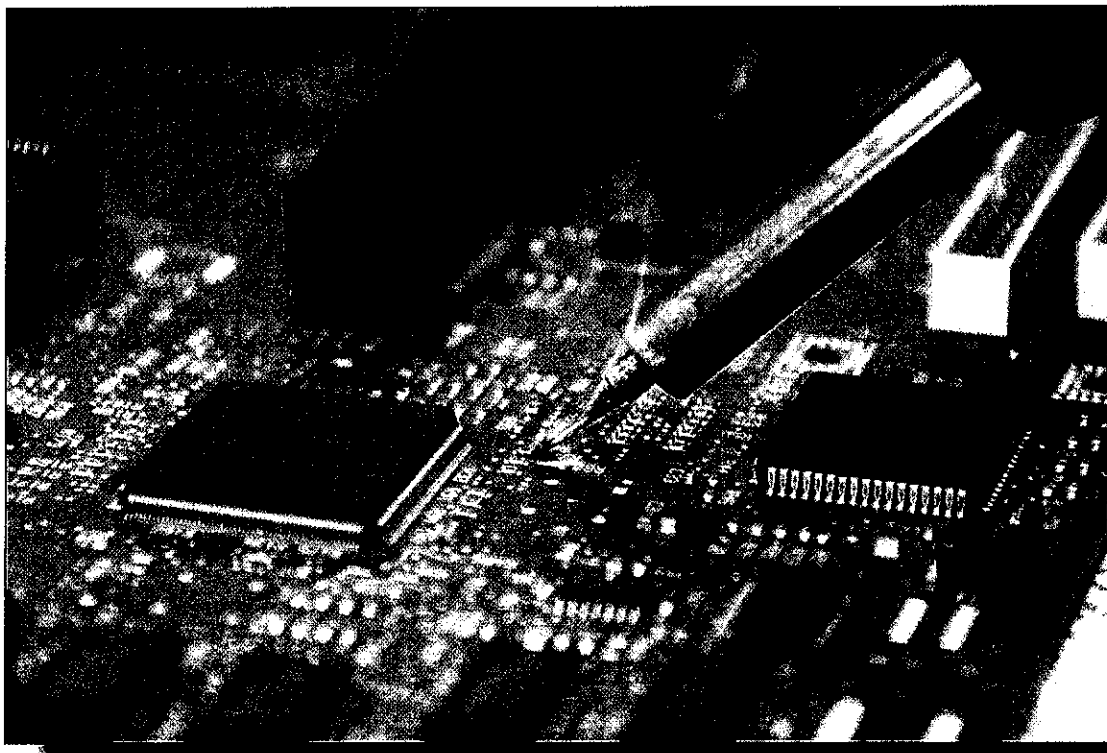
- 10-75** Suponga que el MgO contiene 5% mol de NiO. Diseñe un método de purificación de la solidificación que reduzca el NiO a menos de 1% mol en el MgO.

Problemas de cómputo

- 10-76** *Regla de las fases de Gibbs.* Escriba un programa de cómputo que calcule de manera automática la regla de las fases de Gibbs. El programa debe pedirle al usuario la información sobre si la presión y la temperatura o sólo la presión se mantienen constantes. El programa debe emplear la ecuación correcta para calcular la variable apropiada que el usuario desea conocer. El usuario proveerá entradas para el número de componentes. Después, si el usuario desea proveer el número de fases presentes, el programa debe calcular los grados de libertad y viceversa.
- 10-77** *Conversión de %pe en %at para un sistema binario.* Escriba un programa de cómputo que permitirá la conversión de %pe en %at. El programa debe pedirle al usuario que provea los pesos formularios apropiados de los elementos/compuestos. (Véanse las ecuaciones 10-4 y 10-5.)
- 10-78** *Reglas de Hume-Rothery.* Escriba un programa de cómputo que pronostique si es probable o no una solubilidad sólida del 100% entre dos elementos. El programa debe pedirle al usuario que provea la información sobre las estructuras cristalinas de los elementos o compuestos, los radios de los distintos átomos o iones involucrados y los valores de la valencia y la electronegatividad. Tendrá que realizar suposiciones como qué tanta diferencia entre los valores podría ser aceptable. El programa debe emplear las reglas de Hume-Rothery y proveerle al usuario una guía sobre la posibilidad de la formación de un sistema que permita una solubilidad sólida del 100%.

Knovel® Problemas

- K10-1** ¿Cuál es la temperatura de solidus para un sistema de silicio-germanio que contiene 30% pe de Si?



La soldadura blanda desempeña una función clave en el procesamiento de circuitos impresos y otros dispositivos para la microelectrónica. Este proceso con frecuencia utiliza aleaciones basadas en plomo y estaño. Las composiciones específicas de estas aleaciones conocidas como composiciones eutécticas, se funden a una temperatura constante (como los elementos puros). Estas composiciones también son mecánicamente resistentes dado que su microestructura consiste en una mezcla íntima de dos fases distintas. La mejora de las propiedades mecánicas por la dispersión de una fase en otra fase por medio de la formación de eutécticos es el tema central de este capítulo.

Capítulo

Endurecimiento por dispersión y diagramas de fases eutécticas

¿Se ha preguntado alguna vez?

- ¿Por qué algunos de los primeros vidrieros usaban cenizas de plantas para fabricar vidrios?
- ¿Cuáles son las aleaciones que se utilizan con más frecuencia en la soldadura blanda?
- ¿Qué es una fibra de vidrio?
- ¿Existe una aleación que se solidifique a temperatura constante?
- ¿Qué es el vidrio Pyrex®?

Cuando se excede la solubilidad de un material adicionando demasiado de un elemento o compuesto de aleación, se forma una segunda fase y se produce un material con dos fases. El límite entre las dos fases, conocido como **interfaz de interfases**, es una superficie donde el arreglo atómico no es perfecto. En los materiales metálicos, este límite interfiere con el deslizamiento o movimiento de las dislocaciones, ocasionando su endurecimiento. El término general para tal endurecimiento por la introducción de una segunda fase se le conoce como endurecimiento por dispersión. En este capítulo, primero se explican los fundamentos del endurecimiento por dispersión para determinar la microestructura que se desea producir. Después, se examinan los tipos de reacciones que producen aleaciones con múltiples fases. Por último, se examinan los métodos para lograr el endurecimiento por dispersión a través del control del proceso de solidificación. En este contexto, se examinarán los diagramas de fases que involucran la formación de múltiples fases. El énfasis se concentrará en los diagramas de fases eutécticas.

Se concluirá este capítulo examinando el método de vapor-líquido-sólido del crecimiento de nanoalambres, el cual puede comprenderse considerando los diagramas de fases eutécticas.

11-1 Principios y ejemplos del endurecimiento por dispersión

La mayoría de los materiales de ingeniería están compuestos por más de una fase y muchos de estos materiales se diseñan para proveer un cierto nivel de resistencia. En las aleaciones **endurecidas por dispersión** simples, se introducen partículas pequeñas de una fase, por lo regular muy resistentes y duras, en una segunda fase, la cual es más débil pero más dúctil. A la fase blanda, por lo general continua y presente en cantidades mayores, se le llama **matriz**. A la fase de endurecimiento duro puede llamársele **fase dispersa** o **precipitado**, dependiendo de cómo se forma la aleación. En algunos casos, una fase o una mezcla de fases puede tener una apariencia muy característica —en estos casos, a esta fase o mezcla de fases puede llamársele **microconstituyente**. Para que ocurra el endurecimiento por dispersión, la fase dispersa o precipitado debe ser lo suficientemente pequeña para proveer obstáculos efectivos al movimiento de las dislocaciones, por tanto proveyendo el mecanismo de endurecimiento.

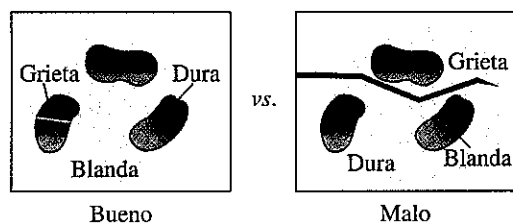
En la mayoría de las aleaciones, el endurecimiento por dispersión se produce por medio de transformaciones de fase. Este capítulo se concentrará en una transformación de solidificación por medio de la cual se solidifica un líquido para formar de manera simultánea dos fases sólidas. A esto se le llama reacción **eutéctica** y es de particular importancia en los hierros colados y muchas aleaciones de aluminio. En el siguiente capítulo, se explicará la reacción **eutectoide**, por medio de la cual una fase sólida reacciona para formar de manera simultánea dos fases sólidas distintas; esta reacción es clave en el control de las propiedades en los aceros. En el capítulo 12, también se explicarán el **endurecimiento por precipitación** (o **por envejecimiento**), el cual produce precipitados por medio de un tratamiento térmico sofisticado.

Cuando el incremento de la resistencia y la tenacidad son los objetivos de la incorporación de una fase dispersa, debe seguirse esta guía (figura 11-1).

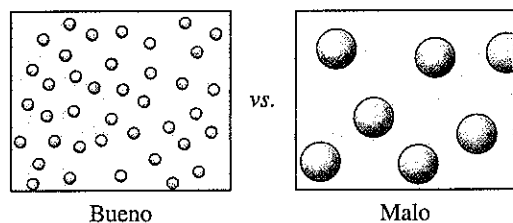
1. La matriz debe ser blanda y dúctil, mientras que la fase dispersa debe ser dura y resistente. Las partículas de la fase dispersa interfieren con el deslizamiento, mientras que la matriz provee al menos algo de ductilidad a la aleación general.
2. La fase dispersa dura debe ser discontinua, mientras que la matriz blanda y dúctil debe ser continua. Si la fase dispersa dura y quebradiza fuese continua, las grietas podrían propagarse a lo largo de toda la estructura.
3. Las partículas de la fase dispersa deben ser pequeñas y numerosas, incrementando la probabilidad de que interfieran con el proceso de deslizamiento dado que el área de la interfaz de interfases aumenta de manera significativa.
4. Las partículas de la fase dispersa deben ser redondas, en vez de en forma de aguja o de borde afilado, debido a que la forma redonda es menos probable que inicie una grieta o actúe como una muesca.
5. Las concentraciones más altas de la fase dispersa incrementan la resistencia de la aleación.

11-2 Compuestos intermetálicos

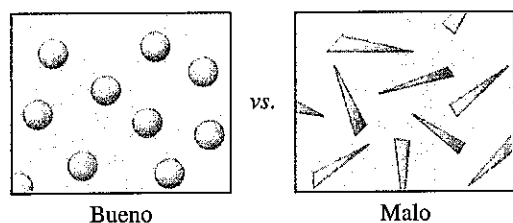
Un **compuesto intermetálico** contiene dos o más elementos metálicos, produciendo una nueva fase con composición, estructura cristalina y propiedades propias. Los compuestos intermetálicos casi siempre son muy duros y quebradizos. Los intermetálicos o compuestos intermetálicos son similares a los materiales cerámicos en términos de sus propiedades mecánicas.



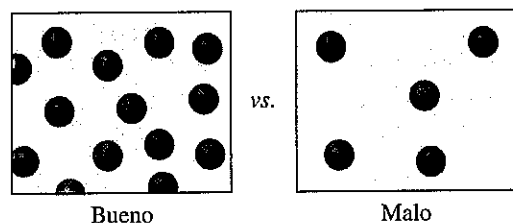
a)



b)



c)



d)

Figura 11-1

Consideraciones para un endurecimiento por dispersión efectivo: a) La fase precipitada debe ser dura y discontinua, mientras que la matriz debe ser continua y blanda, b) las partículas de la fase dispersa deben ser pequeñas y numerosas, c) las partículas de la fase dispersa deben ser redondas en vez de en forma de aguja y d) cantidades mayores de la fase dispersa incrementan el endurecimiento.

El interés en los intermetálicos es doble. Primero, con frecuencia las aleaciones endurecidas por dispersión contienen un compuesto intermetálico como la fase dispersa. Segundo, muchos compuestos intermetálicos, por sí mismos (y no como una segunda fase), se están investigando y desarrollando para aplicaciones a temperaturas altas. En esta sección, se explicarán las propiedades de los intermetálicos como materiales independientes. En las secciones posteriores, se explicará cómo las fases intermetálicas ayudan a endurecer materiales metálicos. La tabla 11-1 resume las propiedades de algunos compuestos intermetálicos.

Los **compuestos intermetálicos estequiométricos** tienen una composición fija. Los aceros con frecuencia se endurecen por medio de un compuesto estequiométrico, carburo de hierro (Fe_3C), el cual tiene una razón fija de tres átomos de hierro a un átomo de carbono. Los

TABLA 11-1 ■ Propiedades de algunos compuestos intermetálicos

Compuestos intermetálicos	Estructura cristalina	Temperatura de fusión (°C)	Densidad ($\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$)	Módulo de Young (GPa)
FeAl	CCCu ordenada	1250-1400	5.6	263
NiAl	CCCa ordenada (*B2)	1640	5.9	206
Ni ₃ Al	CCCa ordenada (*L1 ₂)	1390	7.5	337
TiAl	Tetragonal ordenada (*L1 ₀)	1460	3.8	94
Ti ₃ Al	CH ordenada	1600	4.2	210
MoSi ₂	Tetragonal	2020	6.31	430

*También conocida como. (Adaptada de Meyers, M. A. y Chawla, K. K., *Mechanical behavior of materials*, 2a. ed., Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra, 2009, tabla 12.2. Con permiso de Cambridge University Press.)

compuestos intermetálicos estequiométricos se representan en el diagrama de fases por medio de una línea vertical [figura 11-2a)]. Un ejemplo de un compuesto intermetálico útil es el disiliciuro de molibdeno (MoSi₂). Este material se utiliza para fabricar elementos de calefacción para hornos a altas temperaturas. A temperaturas altas (~1000 a 1600 °C), el MoSi₂ muestra una resistencia a la oxidación sorprendente. A temperaturas bajas (~500 °C y más bajas), el MoSi₂ es quebradizo y muestra una oxidación catastrófica conocida como plaga.

Los **compuestos intermetálicos no estequiométricos** tienen un intervalo de composiciones y en algunas ocasiones se les llaman **soluciones sólidas intermedias**. En el sistema molibdeno-rodio, la fase γ es un compuesto intermetálico no estequiométrico [figura 11-2 b)]. Debido a que la razón de los átomos de molibdeno-rodio no es fija, la fase γ puede contener un %pe de 45 a 83 Rh a 1600 °C. La precipitación de aluminuro de cobre intermetálico no estequiométrico CuAl₂ ocasiona el endurecimiento en varias de las aleaciones de aluminio importantes.

Propiedades y aplicaciones de los intermetálicos Los intermetálicos como el Ti₃Al y el Ni₃Al mantienen sus resistencias e incluso desarrollan una ductilidad utilizable a temperaturas elevadas (figura 11-3). Sin embargo, la menor ductilidad

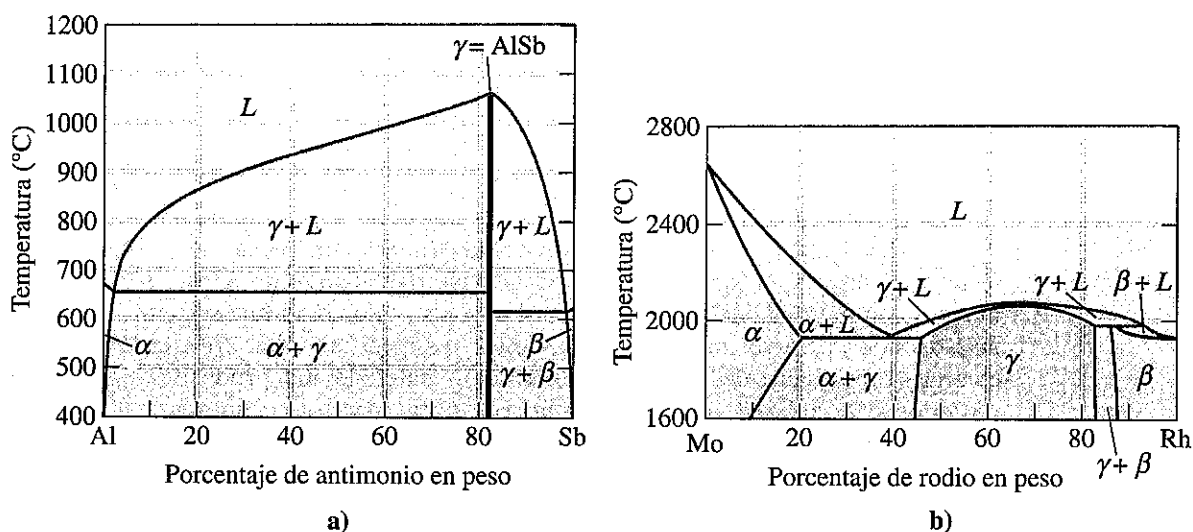


Figura 11-2 a) El diagrama de fases de aluminio-antimonio incluye un compuesto intermetálico estequiométrico. b) El diagrama de fases de molibdeno-rodio incluye un compuesto intermetálico no estequiométrico γ .

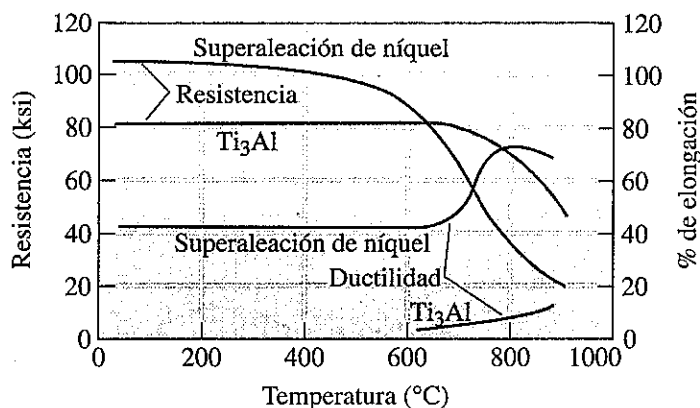


Figura 11-3 Resistencia y ductilidad del compuesto intermetálico Ti_3Al en comparación con las de una superaleación de níquel convencional. El Ti_3Al mantiene su resistencia a temperaturas más altas que la superaleación de níquel.

ha impedido un mayor desarrollo de estos materiales. Se ha demostrado que la adición de niveles pequeños de boro (B) (hasta 0.2%) puede incrementar la ductilidad del Ni_3Al policristalino. El incremento en los niveles de ductilidad podría hacer posible que los intermetálicos se empleen en varias aplicaciones a temperaturas altas y de soporte de carga. Los compuestos ordenados de $NiAl$ y Ni_3Al también son candidatos para aviones supersónicos, motores de jets y aviones comerciales de rapidez altas. No todas las aplicaciones de los intermetálicos son estructurales. Los intermetálicos basados en silicio (por ejemplo, el siliciuro de platino) desempeñan una función útil en la microelectrónica y ciertos intermetálicos como el Nb_3Sn son útiles como superconductores (capítulo 19).

11-3 Diagramas de fases que contienen reacciones de tres fases

Muchos sistemas binarios producen diagramas de fases más complicados que los diagramas de fases isomorfos explicados en el capítulo 10. Los sistemas que se explicarán aquí contienen reacciones que involucran tres fases separadas. En la figura 11-4 se definen cinco de tales reacciones. Cada una de estas reacciones puede identificarse en un diagrama de fases por medio del siguiente procedimiento:

1. Localice una línea horizontal en el diagrama de fases. La línea horizontal, la cual indica la presencia de una reacción de las tres fases, representa la temperatura a la que ocurre la reacción en condiciones de equilibrio.
2. Localice tres puntos distintos en la línea horizontal: los dos puntos extremos más un tercer punto entre los dos puntos extremos de la línea horizontal. Este tercer punto representa la composición a la que ocurre la reacción de las tres fases. En la figura 11-4 el punto intermedio se ha mostrado en el centro; sin embargo, en un diagrama de fases real, este punto no está necesariamente en el centro.
3. Observe inmediatamente arriba del punto intermedio e identifique la fase o fases presentes; observe inmediatamente debajo del punto entre los puntos extremos e identifique la fase o fases presentes. Después escriba la reacción de la(s) fase(s) arriba del punto que se está(n) transformado en la(s) fase(s) debajo del punto. Compare esta reacción con las de la figura 11-4 e identifique la reacción.

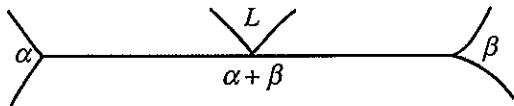
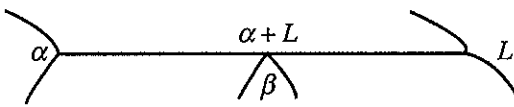
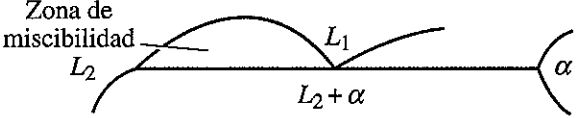
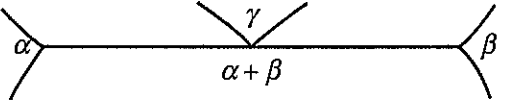
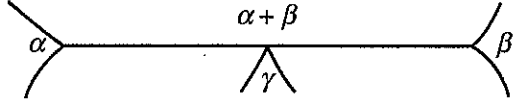
Eutéctica	$L \rightarrow \alpha + \beta$	
Peritética	$\alpha + L \rightarrow \beta$	
Monotética	$L_1 \rightarrow L_2 + \alpha$	
Eutectoide	$\gamma \rightarrow \alpha + \beta$	
Peritectoide	$\alpha + \beta \rightarrow \gamma$	

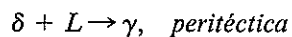
Figura 11-4 Las cinco reacciones de tres fases más importantes en los diagramas de fases binarios.

Ejemplo 11-1

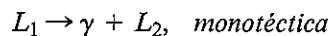
Considere el diagrama de fases binario en la figura 11-5. Identifique las reacciones que ocurren entre las tres.

SOLUCIÓN

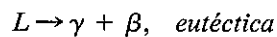
Se encuentran las líneas horizontales a 1150 °C, 920 °C, 750 °C, 450 °C y 300 °C. Para 1150 °C: esta reacción ocurre a 15% B (es decir, el punto intermedio está en 15% B). $\delta + L$ están presentes arriba del punto, γ está debajo. La reacción es:



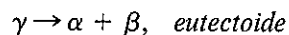
920 °C: esta reacción ocurre a 40% B:



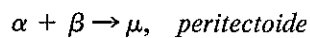
750 °C: esta reacción ocurre a 70% B:



450 °C: esta reacción ocurre a 20% B:



300 °C: esta reacción ocurre a 50% B:



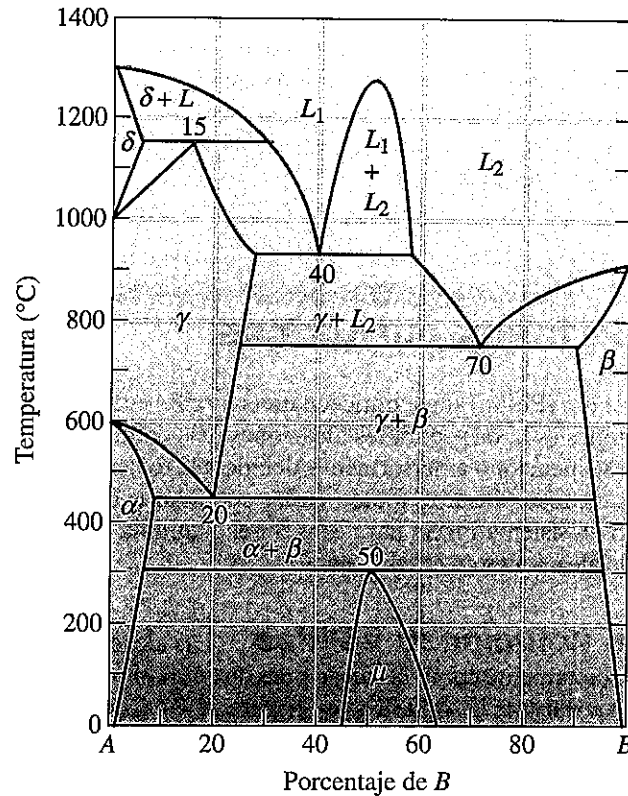


Figura 11-5
Diagrama de fases hipotético
(para el ejemplo 11-1).

Las reacciones eutécticas, **peritéticas** y **monotéticas** son parte del proceso de solidificación. Las aleaciones utilizadas para la colada o soldadura blanda con frecuencia aprovechan el punto de fusión bajo de la reacción eutéctica. El diagrama de fases de las aleaciones monotéticas contiene un domo, o **zona de miscibilidad**, en el que coexisten dos fases líquidas. En el sistema cobre-plomo, la reacción monotética produce glóbulos pequeños de plomo disperso, lo cual mejora la maquinabilidad de la aleación de cobre. Las reacciones peritéticas conducen a una solidificación y segregación sin equilibrio.

En muchos sistemas, existe un **zona de miscibilidad metaestable**. En este caso, el domo de inmiscibilidad se extiende en la región sublíquida. En algunos casos, toda la zona de miscibilidad es metaestable (es decir, el domo de inmiscibilidad está por completo debajo del liquidus). Estos sistemas forman materiales como los vidrios Vycor™ y Pyrex®, también conocidos como vidrios de fases separadas. R. Roy fue el primer científico en describir la ciencia fundamental para la formación de estos vidrios empleando el concepto de una zona de miscibilidad metaestable que existe debajo del liquidus.

Las reacciones eutectoides y **peritectoides** son reacciones de estado sólido por completo. La reacción eutectoide forma la base para el tratamiento térmico de varios sistemas de aleaciones, incluyendo el acero (capítulo 12). La reacción peritectoide es extremadamente lenta, con frecuencia produce estructuras sin equilibrio no deseables en las aleaciones. Como se mencionó en el capítulo 5, la rapidez de difusión de los átomos en los sólidos es mucho menor que en los líquidos.

Cada una de estas reacciones de tres fases ocurre a una temperatura y una composición fijas. La regla de las fases de Gibbs para una reacción de tres fases es (a presión constante),

$$1 + C = F + P$$

$$F = 1 + C - P = 1 + 2 - 3 = 0 \quad (11-1)$$

dato que hay dos componentes C en un diagrama de fases binario y tres fases P están involucradas en la reacción. Cuando las tres fases están en equilibrio durante la reacción, no hay grados de libertad. Como resultado, a estas reacciones se les llaman invariantes. La temperatura y la composición de cada fase involucrada en la reacción entre las tres fases son fijas. Observe que de las cinco reacciones explicadas aquí, sólo las eutécticas y eutectoides pueden conducir al endurecimiento por dispersión.

11-4 Diagrama de fases eutécticas

Los sistemas plomo-estaño (Pb-Sn) sólo contienen una reacción eutéctica simple (figura 11-6). Este sistema de aleaciones es la base para las aleaciones más comunes utilizadas para la soldadura blanda. Como se mencionó anteriormente, debido a la toxicidad del Pb, hay en marcha un esfuerzo intenso para reemplazar el plomo en las soldaduras de Pb-Sn. Sin embargo, se continuará empleando un sistema Pb-Sn para explicar el diagrama de fases eutécticas. Se examinan cuatro clases de aleaciones en este sistema.

Aleaciones de soluciones sólidas Las aleaciones que contienen de 0 a 2% Sn se comportan exactamente como las aleaciones de cobre-níquel; se forma una solución sólida de una sola fase α durante la solidificación (figura 11-7). Estas aleaciones se endurecen por medio del endurecimiento por solución sólida, del endurecimiento por deformación y controlando el proceso de solidificación para refinar la estructura de los granos.

Aleaciones que exceden el límite de solubilidad Las aleaciones que contienen entre 2 y 19% Sn también se solidifican para producir una solución sólida

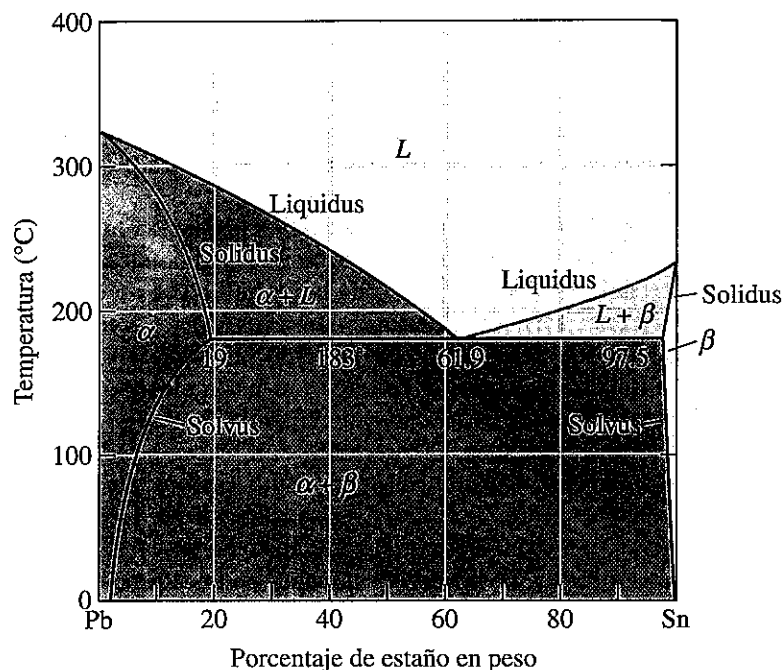


Figura 11-6 Diagrama de fases en equilibrio de plomo-estaño.

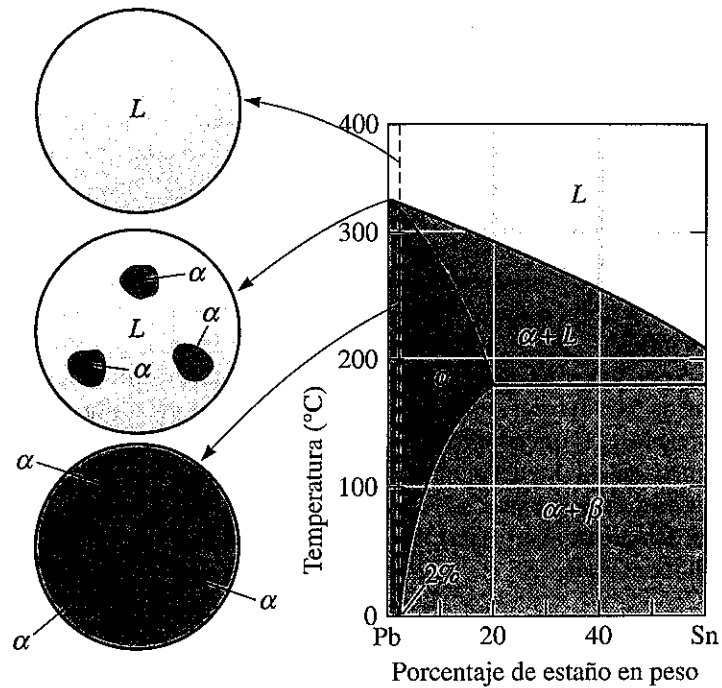


Figura 11-7 Solidificación y microestructura de una aleación de Pb-2% Sn. La aleación es una solución sólida de una sola fase.

de una sola fase α ; sin embargo, a medida que la aleación continúa enfriándose, ocurre una reacción de estado sólido, permitiendo que se precipite una segunda fase sólida (β) a partir de la fase original α (figura 11-8).

En este diagrama de fases, α es una solución sólida de estaño en plomo; sin embargo, la solubilidad del estaño en la solución sólida α es limitada. A 0 °C, sólo puede disolverse 2%

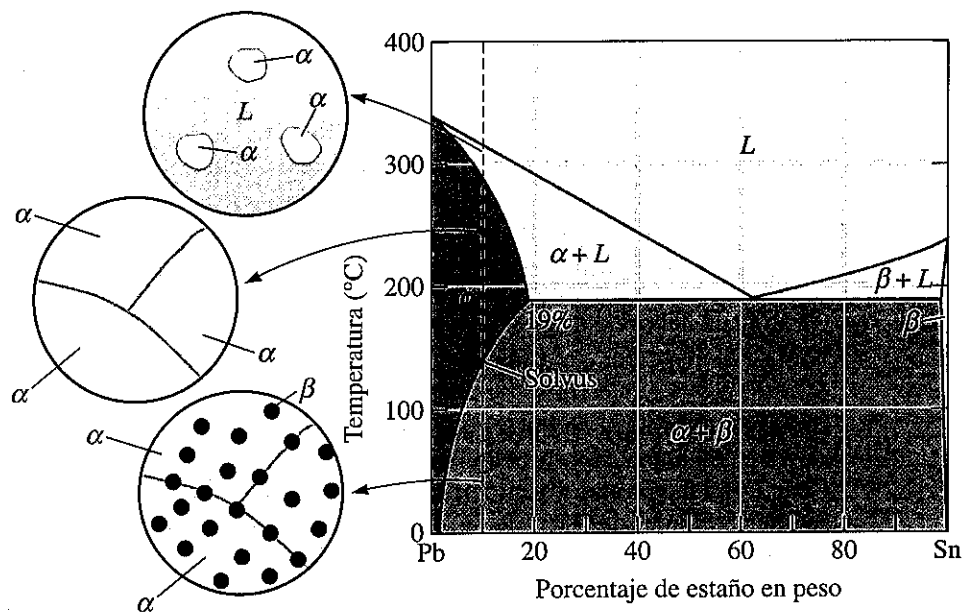


Figura 11-8 Solidificación, precipitación y microestructura de una aleación de Pb-10% Sn. Ocurre algo de endurecimiento por dispersión a medida que el sólido β se precipita.

Sn en α . A medida que la temperatura aumenta, se disuelve más estaño en el plomo hasta que, a 183 °C, la solubilidad del estaño en el plomo ha aumentado a 19% Sn. Ésta es la solubilidad máxima del estaño en el plomo. La solubilidad del estaño en el plomo sólido a cualquier temperatura está dada por la curva de solvus. Cualquier aleación que contenga entre 2 y 19% Sn se enfría a través de solvus, se excede el límite de solubilidad y se forma una cantidad pequeña de β .

Se controlan las propiedades de este tipo de aleación por medio de varias técnicas, incluyendo el endurecimiento por solución sólida de la porción α de la estructura, controlando la microestructura producida durante la solidificación y la cantidad y las características de la fase β . Estos tipos de composiciones, las cuales forman una sola fase sólida a temperaturas altas y dos fases sólidas a temperaturas más bajas, son adecuadas para el endurecimiento por envejecimiento o por precipitación. En el capítulo 12, aprenderá cómo los procesos sin equilibrio son necesarios para fabricar aleaciones endurecidas por precipitación. A una línea vertical en diagrama de fases (por ejemplo, la figura 11-8) que muestra una composición específica se le conoce como **isopleta**. La determinación de las reacciones que ocurren en el enfriamiento de una composición en particular se le conoce como **estudio isopleta**. El siguiente ejemplo ilustra cómo pueden desarrollarse ciertos cálculos relacionados con la composición de las fases y sus concentraciones relativas.

Ejemplo 11-2

Trabaja en el diagrama de fases de plomo-estaño (Pb-Sn)

Determine a) la solubilidad del estaño en el plomo sólido a 100 °C, b) la solubilidad máxima del plomo en el estaño sólido, c) la cantidad de β que se forma si se enfría a 0 °C una aleación de Pb-10% Sn, d) las masas del estaño contenido en las fases α y β y e) la masa del plomo contenido en las fases α y β . Suponga que la masa total de la aleación de Pb-10% Sn es de 100 gramos.

SOLUCIÓN

En la figura 11-8 se muestra el diagrama de fases necesario. Todos los porcentajes se muestran en porcentaje en peso.

a) La temperatura de 100 °C interseca la curva de solvus en 6% de Sn. La solubilidad del estaño (Sn) en el plomo (Pb) a 100 °C es por tanto del 6%.

b) La solubilidad máxima del plomo (Pb) en el estaño (Sn), la cual se encuentra a partir del lado rico en estaño del diagrama de fases, ocurre a la temperatura eutéctica de 183 °C y es de 97.5% de Sn o 2.5% de Pb.

c) A 0 °C, la aleación de 10% de Sn está en la región $\alpha + \beta$ del diagrama de fases. Trazando la línea de interconexión a 0 °C y aplicando la regla de la palanca, se encuentra que

$$\% \beta = \frac{10 - 2}{100 - 2} \times 100 = 8.2\%$$

Observe que la línea de interconexión interseca la curva de solvus para la solubilidad del Pb en Sn a una concentración distinta de cero de Sn. No se puede leer con exactitud a partir del diagrama; sin embargo, se supone que el punto a la derecha para la línea de intersección es de 100% de Sn. El porcentaje (%) de α sería $(100 - \% \text{ de } \beta) = 91.8\%$. Esto significa que si se tienen 100 g de la aleación con 10% de Sn, consistirá en 8.2 g de la fase β y 91.8 g de la fase α .

d) Observe que 100 g de la aleación consistirán en 10 g de Sn y 90 g de Pb. El Pb y el Sn están distribuidos en dos fases (es decir, α y β). La masa del Sn en la fase $\alpha = 2\%$

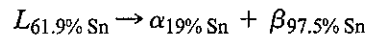
$\text{Sn} \times 91.8 \text{ g de la fase } \alpha = 0.02 \times 91.8 \text{ g} = 1.836 \text{ g}$. Dado que el estaño (Sn) aparece en las fases α y β , la masa del Sn en la fase β será $= (10 - 1.836) \text{ g} = 8.164 \text{ g}$. Observe que en este caso, la fase β a 0°C es casi Sn puro.

e) Ahora se calcula la masa del plomo en las dos fases. La masa del Pb en la fase α será igual a la masa de la fase α menos la masa del Sn en la fase $\alpha = 91.8 \text{ g} - 1.836 \text{ g} = 89.964 \text{ g}$. También se pudo haber calculado esto como

$$\begin{aligned}\text{Masa del Pb en la fase } \alpha &= 98\% \text{ Pb} \times 91.8 \text{ g de la fase } \alpha = 0.98 \times 91.8 \text{ g} \\ &= 89.964 \text{ g}\end{aligned}$$

Se conoce la masa total del plomo (90 g) y también la masa del plomo en la fase α . Por tanto, la masa del Pb en la fase $\beta = 90 - 89.964 = 0.036 \text{ g}$. Esto es consistente con lo que se dijo anteriormente (es decir, la fase β , en este caso, es casi estaño puro).

Aleaciones eutécticas La aleación que contiene 61.9% de Sn tiene composición eutéctica (figura 11-9). La palabra eutéctica proviene del griego *eutectos* que significa fusionado con facilidad. De hecho, en un sistema binario que muestre una reacción eutéctica, una aleación con una composición eutéctica tiene la temperatura de fusión más baja. Ésta es la composición para la que no hay intervalo de solidificación (es decir, la solidificación de esta aleación ocurre a una temperatura, 183°C en el sistema Pb-Sn). Por encima de los 183°C la aleación es toda líquida y, por tanto, debe contener 61.9% de Sn. Después de que el líquido se enfría a 183°C , comienza la reacción eutéctica:



Se forman dos soluciones sólidas — α y β — durante la reacción eutéctica. Las composiciones de las dos soluciones sólidas están dadas por los extremos de la línea eutéctica.

Durante la solidificación, el crecimiento del eutéctico requiere la eliminación del calor latente de fusión y la redistribución por difusión de las dos especies atómicas distintas. Dado

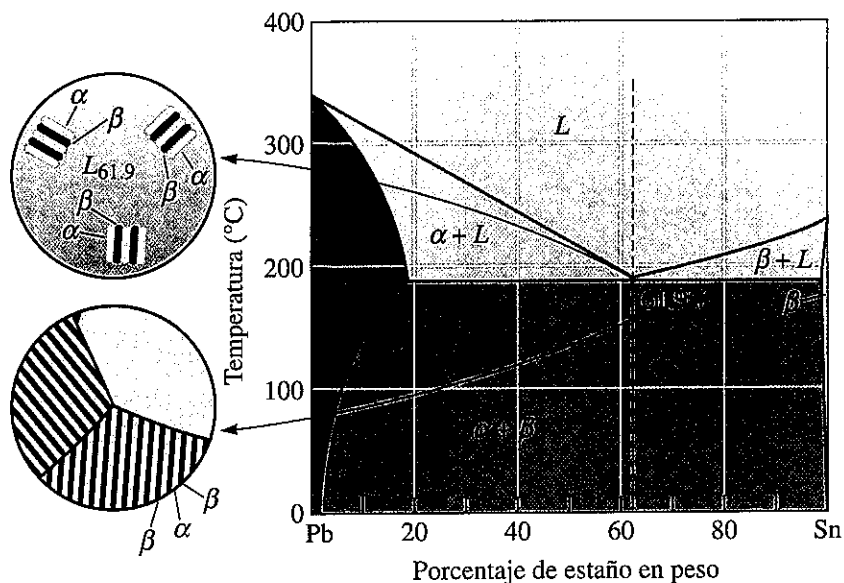


Figura 11-9 Solidificación y microestructura de la aleación eutéctica de Pb-61.9% Sn.

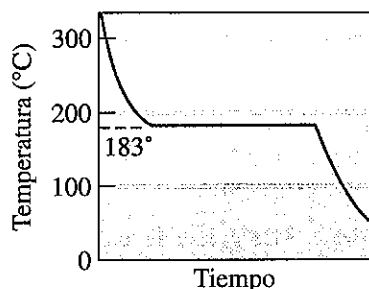


Figura 11-10

La curva de enfriamiento para una aleación eutéctica es una estabilización térmica simple, dado que los eutécticos se solidifican o se fusionan a una sola temperatura.

que la solidificación ocurre por completo a 183 °C, la curva de enfriamiento (figura 11-10) es similar a la de un metal puro; es decir, ocurre una estabilización térmica o una meseta a la temperatura eutéctica. En el capítulo 9 se afirmó que la aleación se solidifica en un intervalo de temperaturas (entre el liquidus y el solidus) conocido como intervalo de solidificación. Las composiciones eutécticas son una excepción a esta regla dado que se transforman de líquido a sólido a una temperatura constante (es decir, la temperatura eutéctica).

A medida que los átomos se redistribuyen durante la solidificación eutéctica, se desarrolla una microestructura característica. En el sistema plomo-estaño, las fases sólidas α y β crecen del líquido en un arreglo **laminar**, o parecido a una placa (figura 11-11). La estructura laminar permite que los átomos de plomo y estaño se muevan a través del líquido, en el cual la difusión es rápida, sin tener que moverse una distancia considerable. Esta estructura laminar es característica de varios otros sistemas eutécticos.

El producto de la reacción eutéctica tiene un arreglo característico de las dos fases sólidas llamado **microconstituyente eutéctico**. En la aleación de Pb-61.9% Sn, se forma 100% del microconstituyente eutéctico, dado que todo el líquido pasa a través de la reacción. El siguiente ejemplo muestra cómo pueden calcularse las cantidades y las composiciones de las fases presentes en una aleación eutéctica.

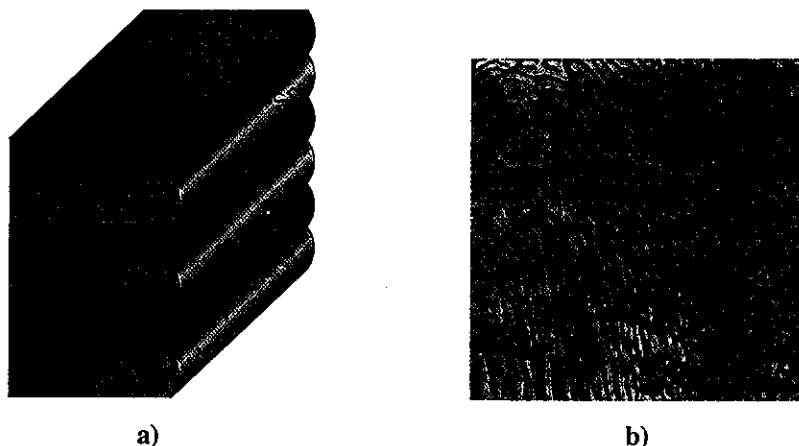


Figura 11-11 a) Redistribución atómica durante el crecimiento laminar de un eutéctico de plomo-estaño. Los átomos de estaño del líquido se difunden de manera preferencial hacia las placas β y los átomos de plomo se difunden hacia las placas α . b) Fotomicrografía del microconstituyente eutéctico de plomo-estaño (400 $\times$). (Reimpresión por cortesía de Don Askeland.)

Ejemplo 11-3

a) Determine la cantidad y la composición de cada fase en una aleación de composición eutéctica de plomo-estaño de 200 g inmediatamente después de que se ha completado la reacción eutéctica. b) Calcule la masa de las fases presentes. c) Calcule las masas de plomo y estaño en cada fase.

SOLUCIÓN

a) La aleación eutéctica contiene 61.9% de Sn. Se aplica la ley de la palanca a una temperatura justo por debajo de la eutéctica, dígame, a 182 °C, dado que es la temperatura a la que la reacción eutéctica recién se completa. El fulcro de la palanca está a 61.9% de Sn. La composición de α es Pb-19% Sn y la composición de β es Pb-97.5% Sn. Los extremos de la línea de interconexión coinciden de manera aproximada con los extremos de la línea eutéctica.

$$\alpha: (\text{Pb} - 19\% \text{ Sn}) \% \alpha = \frac{97.5 - 61.9}{97.5 - 19.0} \times 100 = 45.35\%$$

$$\beta: (\text{Pb} - 97.5\% \text{ Sn}) \% \beta = \frac{61.9 - 19.0}{97.5 - 19.0} \times 100 = 54.65\%$$

De manera alterna, se podría decir que la fracción en peso de la fase α es de 0.4535 y la de la fase β es de 0.5465.

Una muestra de 200 g de la aleación contendría un total de $200 \times 0.6190 = 123.8$ g de Sn y 76.2 g de plomo. La masa total de plomo y estaño no cambia como resultado de la conservación de la masa. Lo que cambia es la masa de plomo y estaño en las diferentes fases.

b) A una temperatura justo por debajo de la eutéctica:

$$\begin{aligned} \text{La masa de la fase } \alpha \text{ en 200 g de la aleación} \\ &= \text{masa de la aleación} \times \text{fracción de la fase } \alpha \\ &= 200 \times 0.4535 = 90.7 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{La cantidad de la fase } \beta \text{ en 200 g de la aleación} \\ &= (\text{masa de la aleación} - \text{masa de la fase } \alpha) \\ &= 200.0 \text{ g} - 90.7 = 109.3 \text{ g} \end{aligned}$$

También se podría escribir esto como

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de la fase } \beta \text{ en 200 g de la aleación} \\ &= \text{masa de la aleación} \times \text{fracción de la fase } \beta \\ &= 200 \text{ g} \times 0.5465 = 109.3 \text{ g} \end{aligned}$$

Por tanto, a una temperatura justo por debajo de la eutéctica (es decir, a 182 °C), la aleación contiene 109.3 g de la fase β y 90.7 g de la fase α .

c) Ahora se calcula las masas de plomo y estaño en las fases α y β :

$$\begin{aligned} \text{Masa de Pb en la fase } \alpha &= \text{masa de la fase } \alpha \text{ en 200 g} \\ &\quad \times (\text{fracción en peso de Pb en } \alpha) \\ \text{Masa de Pb en la fase } \alpha &= 90.7 \text{ g} \times (1 - 0.19) = 73.5 \text{ g} \end{aligned}$$

Masa de Sn en la fase α = masa de la fase α - masa de Pb en la fase α

Masa de Sn en la fase α = $(90.7 - 73.5 \text{ g}) = 17.2 \text{ g}$

Masa de plomo en la fase β = masa de la fase β en 200 g $\times$ (fracción en peso de Pb en β)

Masa de plomo en la fase β = $(109.3 \text{ g}) \times (1 - 0.975) = 2.7 \text{ g}$

Masa de Sn en la fase β = masa total de Sn - masa de Sn en la fase α

Masa de Sn en la fase β = $123.8 \text{ g} - 17.2 \text{ g} = 106.6 \text{ g}$

Observe que se pudo haber obtenido el mismo resultado considerando la masa total de plomo como se muestra a continuación:

Masa total de plomo en la aleación = masa de plomo en la fase α
+ masa de plomo en la fase β

$76.2 \text{ g} = 73.5 \text{ g} + \text{masa de plomo en la fase } \beta$

Masa de plomo en la fase β = $76.2 - 73.5 \text{ g} = 2.7 \text{ g}$

La figura 11-12 resume las varias concentraciones y masas. Este análisis confirma que la mayor parte de plomo en la aleación eutéctica se concentra en la fase α . La mayor parte de estaño se concentra en la fase β .

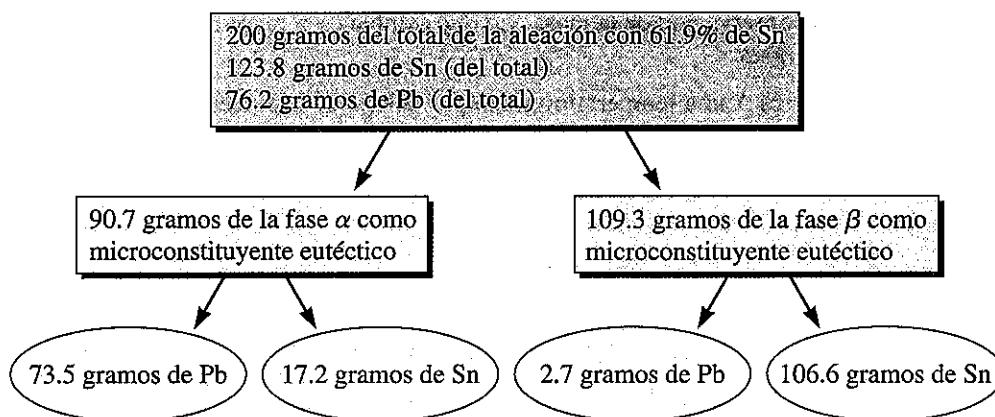


Figura 11-12 Resumen de los cálculos (para el ejemplo 11-3).

Aleaciones hipoeutécticas e hipereutécticas Una aleación hipoeutéctica es una aleación con una composición entre la del extremo izquierdo de la línea de interconexión que define la reacción eutéctica y la composición eutéctica. A medida que una aleación hipoeutéctica que contiene entre 19 y 61.9% de Sn se enfría, el líquido comienza a solidificarse a la temperatura de liquidus, produciendo un sólido α ; sin embargo, la solidifi-

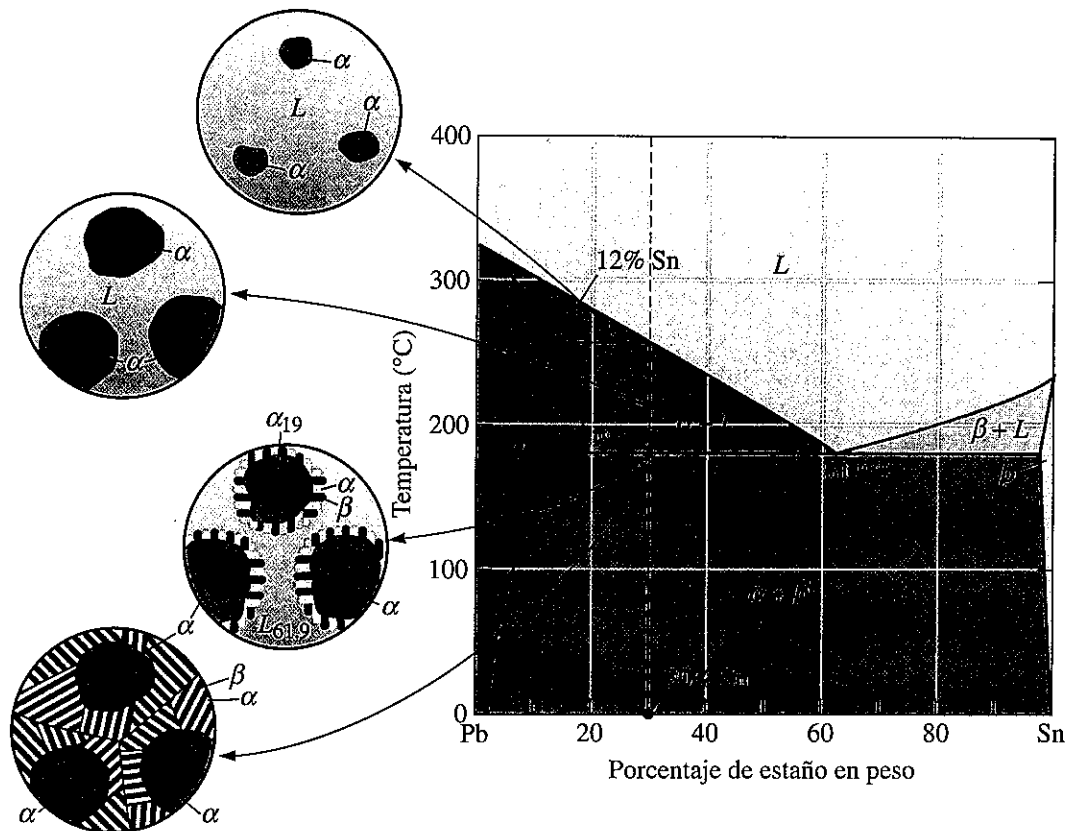


Figura 11-13 Solidificación y microestructura de una aleación hipoeutéctica (Pb-30% Sn).

cación se completa al pasar a través de la reacción eutéctica (figura 11-13). Esta secuencia de solidificación ocurre para las composiciones en las que la línea vertical que corresponde a la composición original de la aleación atraviesa el liquidus y el eutéctico.

A la composición de una aleación entre la del extremo derecho de la línea de interconexión que define la reacción eutéctica y la composición eutéctica se le conoce como **aleación hipereutéctica**. En el sistema Pb-Sn, cualquier composición entre 61.9 y 97.5% de Sn es hipereutéctica.

Considere una aleación hipoeutéctica que contiene Pb-30% Sn y siga los cambios en la estructura durante la solidificación (figura 11-13). Al alcanzar la temperatura de liquidus de 260 °C, el sólido α que contiene alrededor de 12% de Sn nuclea. El sólido α crece hasta que la aleación se enfría justo por debajo de la temperatura eutéctica. A 184 °C, se traza una línea de interconexión y se encuentra que el sólido α contiene 19% de Sn y el líquido restante contiene 61.9% de Sn. Se observa que a 184 °C, ¡el líquido contiene la composición eutéctica! Cuando la aleación se enfría por debajo de 183 °C, todo el líquido restante pasa por la reacción eutéctica y se transforma en una mezcla laminar de α y β . Resulta la microestructura mostrada en la figura 11-14a). Observe que el microconstituyente eutéctico rodea el sólido α que se forma entre las temperaturas de liquidus y la eutéctica. El microconstituyente eutéctico es continuo y la fase primaria se dispersa entre las colonias del microconstituyente eutéctico.

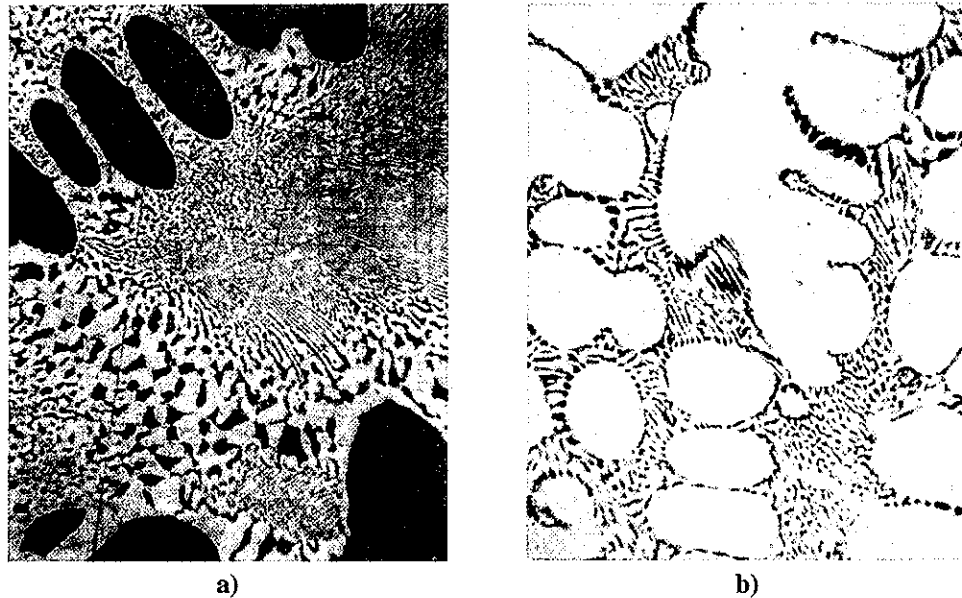


Figura 11-14 a) Aleación hipoeutéctica de plomo-estaño. b) Aleación hipereutéctica de plomo-estaño. El constituyente oscuro es el sólido α rico en plomo, el constituyente claro es el sólido β rico en estaño y la estructura de placa fina es el eutéctico (400 $\times$). (Micrografías reimpresas por cortesía de Don Askeland.)

Ejemplo 11-4

Determinación de las fases y las cantidades en una aleación hipoeutéctica de Pb-30% Sn

Para una aleación de Pb-30% Sn, determine las fases presentes, sus cantidades y sus composiciones a 300 °C, 200 °C, 184 °C, 182 °C y 0 °C.

SOLUCIÓN

Temperatura (°C)	Fases	Composiciones	Cantidades
300	L	L : 30% Sn	$L = 100\%$
200	$\alpha + L$	L : 55% Sn	$L = \frac{30 - 18}{55 - 18} \times 100 = 32\%$
		α : 18% Sn	$\alpha = \frac{55 - 30}{55 - 18} \times 100 = 68\%$
184	$\alpha + L$	L : 61.9% Sn	$L = \frac{30 - 19}{61.9 - 19} \times 100 = 26\%$
		α : 19% Sn	$\alpha = \frac{61.9 - 30}{61.9 - 19} \times 100 = 74\%$
182	$\alpha + \beta$	α : 19% Sn	$\alpha = \frac{97.5 - 30}{97.5 - 19} \times 100 = 86\%$
		β : 97.5% Sn	$\beta = \frac{30 - 19}{97.5 - 19} \times 100 = 14\%$
0	$\alpha + \beta$	α : 2% Sn	$\alpha = \frac{100 - 30}{100 - 2} \times 100 = 71\%$
		β : 100% Sn	$\beta = \frac{30 - 2}{100 - 2} \times 100 = 29\%$

Observe que en estos cálculos, se han redondeado las fracciones al porcentaje más cercano. Esto puede dar problemas si se calcularan las masas de distintas fases, ya que no se podría conservar el balance de las masas. Por lo regular es una buena idea no redondear estos porcentajes si van a desarrollar cálculos que traten con cantidades de distintas fases o masas de elementos en fases diferentes.

La fase sólida α que se forma cuando el líquido se enfría entre las temperaturas de liquidus y la de eutéctico se le llama **microconstituyente primario** o **proeutéctico**. Este sólido α no toma parte en la reacción eutéctica. Por tanto, la morfología y apariencia de esta fase α son distintas de las de la fase α que aparece en el microconstituyente eutéctico. Con frecuencia se encuentra que las cantidades y las composiciones de los microconstituyentes son de mayor utilidad que las cantidades y las composiciones de las fases.

Ejemplo 11-5

Cantidad y composición del microconstituyente para una aleación hipoeutéctica

Determine las cantidades y las composiciones de cada microconstituyente en una aleación de Pb-30% Sn inmediatamente después que se ha completado la reacción eutéctica.

SOLUCIÓN

Ésta es una composición hipoeutéctica. Por tanto, los microconstituyentes esperados son α primario y el eutéctico. Observe que se siguen teniendo sólo dos fases (α y β).

Se pueden determinar las cantidades y las composiciones de los microconstituyentes si se observa cómo se forman. El microconstituyente α *primario* es todo el sólido α que se forma antes de que la aleación se enfríe a la temperatura eutéctica; el microconstituyente eutéctico es todo el líquido que pasa por la reacción eutéctica. A una temperatura justo por debajo de la eutéctica —dígase, de 184 °C— las cantidades y las composiciones de las dos fases son:

$$\alpha: 19\% \text{ Sn, } \% \alpha = \frac{61.9 - 30}{61.9 - 19} \times 100 = 74\% = \% \alpha \text{ primario}$$

$$L: 61.9\% \text{ Sn, } \% L = \frac{30 - 19}{61.9 - 19} \times 100 = 26\% = \% \text{ eutéctico a } 182^\circ\text{C}$$

Por tanto, el microconstituyente alfa primario se obtiene determinando la cantidad de α presente a la temperatura justo por debajo de la eutéctica. La cantidad del microconstituyente eutéctico a una temperatura *justo por debajo* de la eutéctica (por ejemplo, de 182 °C) se determina calculando la cantidad del líquido *justo por encima* de la temperatura eutéctica (por ejemplo, a 184 °C), dado que todo este líquido de la composición eutéctica se transforma en el microconstituyente eutéctico. Observe que a la temperatura eutéctica (183 °C), la reacción eutéctica está en progreso (se completa la formación del proeutéctico α); por tanto, la cantidad del microconstituyente eutéctico a 183 °C cambiará con el tiempo (comenzando en 0% y finalizando en 26% de eutéctico, en este caso). Por favor asegúrese de que comprende este ejemplo dado que varios estudiantes tienden a fallar en la forma en que se desarrolla este cálculo.

Cuando la aleación se enfría por debajo de la temperatura eutéctica a 182 °C, todo el líquido a 184 °C se transforma en el eutéctico y la composición del microconstituyente eutéctico es de 61.9% de Sn. La fase sólida α presente a 184 °C permanece sin cambiar después de enfriarse a 182 °C y es el microconstituyente primario.

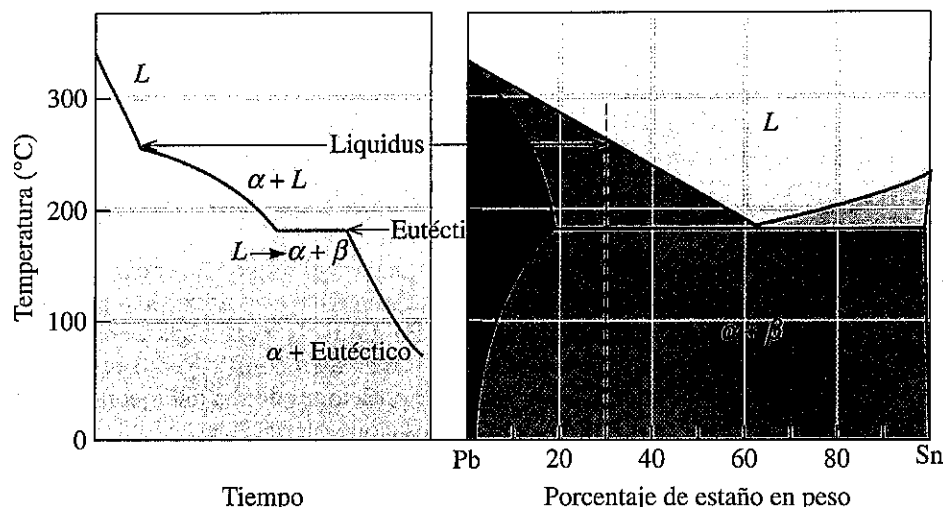


Figura 11-15 Curva de enfriamiento para una aleación hipoeutéctica de Pb-30% Sn.

La curva de enfriamiento para una aleación hipoeutéctica está conformada por aquellas para las aleaciones de solución sólida y las aleaciones eutécticas “rectas” (figura 11-15). Ocurre un cambio en la pendiente en el liquidus a medida que la α primaria comienza a formarse. La evolución del calor latente de fusión disminuye la rapidez de enfriamiento a medida que el sólido α crece. Cuando la aleación se enfría a la temperatura eutéctica, se produce una estabilización térmica a medida que la reacción eutéctica procede a 183 °C. Esta secuencia de solidificación es similar en una aleación hipereutéctica, dando la microestructura mostrada en la figura 11-14b).

11-5 Resistencia de las aleaciones eutécticas

Cada fase en la aleación eutéctica está, hasta cierto grado, endurecida por solución sólida. En el sistema plomo-estaño, α , la cual es una solución sólida de estaño en plomo, es más resistente que el plomo puro (capítulo 10). Algunas aleaciones eutécticas pueden endurecerse por medio de trabajo en frío. También se controla el tamaño de los granos adicionando los inoculantes o refinadores de granos apropiados durante la solidificación. Por último, se puede influir sobre las propiedades controlando la cantidad y la microestructura del eutéctico.

Tamaño de las colonias eutécticas Cada una de las colonias eutécticas nuclea y crecen de manera independiente. Dentro de cada colonia, la orientación de las láminas en el microconstituyente eutéctico es idéntica. La orientación cambia al atravesar un límite de las colonias [figura 11-16a)]. Se pueden refinar las colonias eutécticas y mejorar la resistencia de la aleación eutéctica por medio de la inoculación (capítulo 9).

Espaciamiento interlaminar El espaciamiento interlaminar de un eutéctico es la distancia del centro de una lámina α al centro de la siguiente lámina α [figura 11-16b)]. Un espaciamiento interlaminar pequeño indica que la cantidad del área de la interfaz α - β es grande. Un espaciamiento interlaminar pequeño incrementa por tanto la resistencia del eutéctico.

El espaciamiento interlaminar está determinado principalmente por la rapidez de crecimiento del eutéctico.

$$\gamma = cR^{-1/2} \quad (11-2)$$

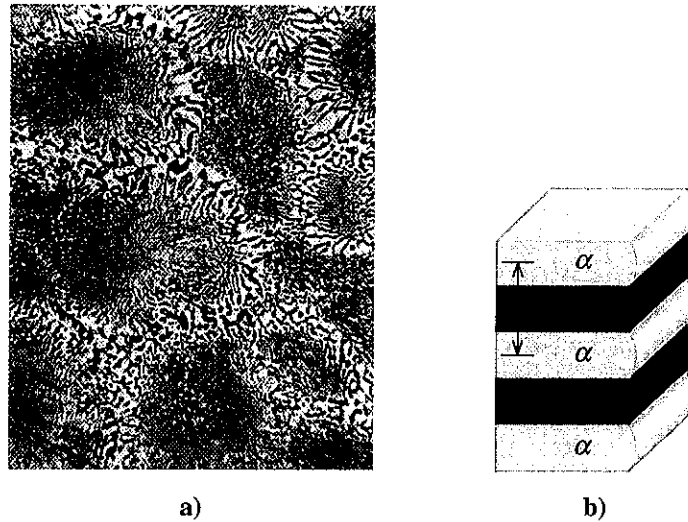


Figura 11-16 a) Colonias en el eutéctico de plomo-estaño (300 $\times$). b) Espaciamento interlaminar en una microestructura eutéctica.

donde R es la rapidez de crecimiento (cm/s) y c es una constante. En la figura 11-17 se muestra el espaciamento interlaminar para el eutéctico de plomo-estaño. Se puede incrementar la rapidez de crecimiento R , y en consecuencia reducir el espaciamento interlaminar incrementando la rapidez de enfriamiento o reduciendo el tiempo de solidificación. El siguiente ejemplo demuestra cómo puede controlarse la solidificación de una aleación de Pb-Sn.

Cantidad de eutéctico También se controlan las propiedades por medio de las cantidades relativas del microconstituyente primario y del eutéctico. En el sistema plomo-estaño, la cantidad del microconstituyente eutéctico cambia de 0 a 100% cuando se incrementa el contenido de estaño de 19 a 61.9%. Con el incremento de las cantidades del microconstituyente eutéctico más resistente, la resistencia de la aleación aumenta (figura 11-18). De manera similar, cuando se incrementa el plomo adicionado al estaño de 2.5 a 38.1% de Pb, la cantidad de β primario en la aleación hipereutéctica disminuye, la cantidad del eutéctico resistente aumenta y la resistencia se incrementa. Cuando las fases individuales tienen casi la misma resistencia, se espera que la aleación eutéctica tenga la resistencia más alta debido al endurecimiento por dispersión efectivo.

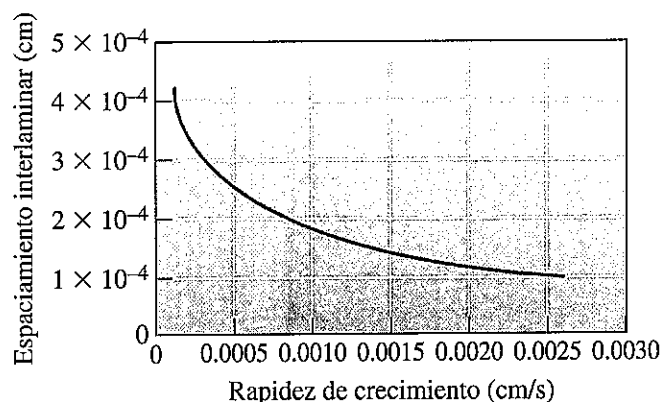


Figura 11-17 Efecto de la rapidez de crecimiento sobre el espaciamento interlaminar en el eutéctico de plomo-estaño.

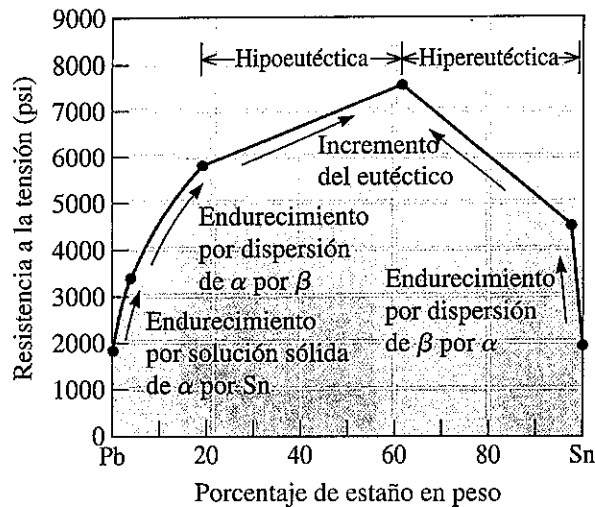


Figura 11-18

Efecto de la composición y del mecanismo de endurecimiento sobre la resistencia a la tensión de las aleaciones de plomo-estaño.

Microestructura del eutéctico

No todos los eutécticos dan una estructura laminar. Las formas de las dos fases en el microconstituyente están influidas por la rapidez de enfriamiento, la presencia de elementos impuros y la naturaleza de la aleación.

El diagrama de fases del eutéctico de aluminio-silicio (figura 11-19) forma la base para una variedad de aleaciones comerciales importantes. La porción de silicio del eutéctico crece en forma de placas planas delgadas que aparecen como agujas en una fotomicrografía [figura 11-20a)]. Las plaquetas de silicio quebradizas concentran los esfuerzos y reducen la ductilidad y la tenacidad.

La microestructura eutéctica en las aleaciones de aluminio-silicio se altera por medio de la modificación. La **modificación** ocasiona que la fase de silicio crezca como barras delgadas interconectadas entre las dendritas del aluminio [figura 11-20b)], mejorando la resistencia a la tensión y el porcentaje de elongación. En dos dimensiones, el silicio modificado parece estar compuesto de partículas redondas pequeñas. Las aleaciones enfriadas de manera rápida, como aquellas utilizadas para el colado en matriz, son modificadas de manera natural durante la solidificación. Sin embargo, a rapidez de enfriamiento menores debe adicionarse alrededor de 0.02% de Na o 0.01% de Sr para ocasionar la modificación.

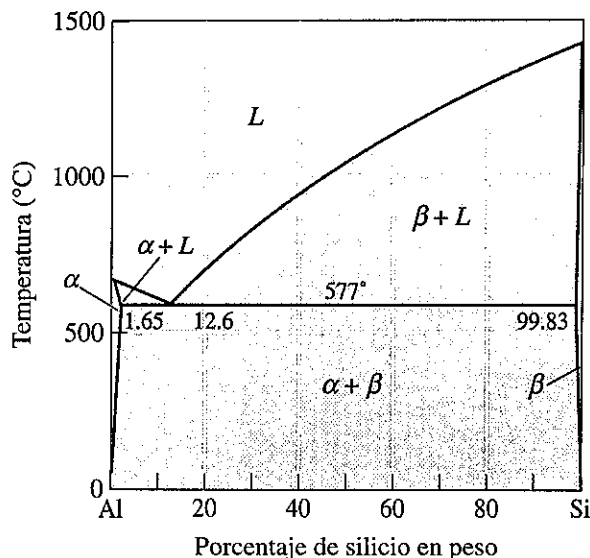


Figura 11-19

Diagrama de fases aluminio-silicio.

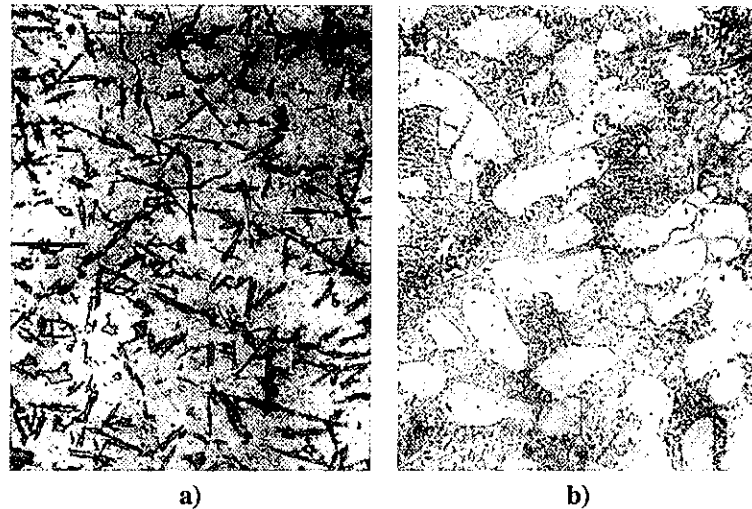


Figura 11-20 Microestructuras eutécticas comunes: a) placas de silicio parecidas a agujas en el eutéctico de aluminio-silicio (100 $\times$) y b) barras de silicio redondas en el eutéctico modificado de aluminio-silicio (100 $\times$). (Reimpresión por cortesía de Don Askeland.)

La forma de la fase primaria también es importante. Con frecuencia la fase primaria crece de manera dendrítica; la disminución del espaciamiento de las ramas de dendritas secundarias de la fase primaria puede mejorar las propiedades de la aleación. En las aleaciones hipereutécticas de aluminio-silicio, la β gruesa es la fase primaria [figura 11-21a]. Debido a que β es dura, las aleaciones hipereutécticas son resistentes al desgaste y se utilizan para producir partes de motores para automóviles, pero la β gruesa ocasiona una maquinabilidad deficiente y segregación por gravedad (donde la β primaria flota hacia la superficie de la pieza colada durante la solidificación). La adición de 0.05% fósforo (P) promueve la nucleación del silicio primario, refina su tamaño y minimiza sus cualidades nocivas [figura 11-21b)]. Los dos ejemplos siguientes muestran cómo pueden diseñarse las composiciones eutécticas para que alcancen ciertos niveles de propiedades mecánicas.

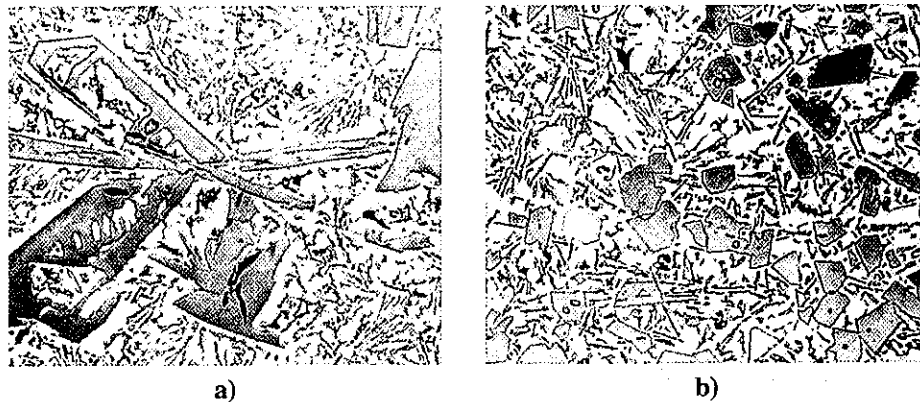


Figura 11-21 Efecto del endurecimiento con fósforo sobre la microestructura de las aleaciones hipereutécticas de aluminio-silicio: a) el silicio primario grueso y b) el silicio primario fino, refinado por la adición de fósforo (75 $\times$). (De ASM Handbook, vol. 7 (1972), ASM International, Materiales Park, OH 44073.)

Ejemplo 11-6*Diseño de un material de relleno para reparar abolladuras*

Una manera de reparar las abolladuras en un metal es frotar un material parcialmente líquido-parcialmente sólido en la abolladura y después permitir que este material de relleno se solidifique. Para esta aplicación, el material para el frotamiento debe tener las siguientes especificaciones: 1) una temperatura de fusión por debajo de 230 °C, 2) una resistencia a la tensión en exceso de 6000 psi, 3) ser de 60 a 70% líquido durante la aplicación y 4) ser lo más económico posible. Diseñe una aleación y un procedimiento de reparación que cumplan estas especificaciones. Puede desear considerar una aleación de Pb-Sn.

SOLUCIÓN

Se ve si una de las aleaciones de Pb-Sn cumplirá estas condiciones. Primero, la aleación debe contener más de 40% de Sn para que tenga una temperatura de fusión por debajo de 230 °C (figura 11-6). Esta temperatura baja hará que sea más sencillo para la persona realizar las reparaciones aplicando el relleno.

Segundo, la figura 11-18 indica que el contenido de estaño debe estar entre 23 y 80% para obtener la resistencia a la tensión requerida de 6000 psi. En combinación con el primer requerimiento, cualquier aleación que contenga entre 40 y 80% de Sn será satisfactoria.

Tercero, el costo del estaño es de alrededor de \$5500/ton mientras que el del plomo es de \$550/ton. Por tanto, una aleación de Pb-40% Sn podría ser la elección más económica. También existen otras consideraciones, como: ¿cuál es la geometría? ¿La aleación puede fluir bien en esa geometría (es decir, la viscosidad del metal fundido)?

Por último, el material de relleno debe estar a la temperatura correcta para ser de 60 a 70% líquido. Como muestran los cálculos que aparecen abajo, la temperatura debe estar entre 200 y 210 °C:

$$\% L_{200} = \frac{40 - 18}{55 - 18} \times 100 = 60\%$$

$$\% L_{210} = \frac{40 - 17}{50 - 17} \times 100 = 70\%$$

Por tanto, la recomendación es utilizar una aleación de Pb-40% Sn aplicada a 205 °C, una temperatura a la que será 65% líquida y 35% α primaria. Como se mencionó anteriormente, también se debe poner atención en la toxicidad del plomo y a cualquier responsabilidad legal que pueda ocasionar el uso de tales materiales. Se han inventado varias soldaduras nuevas libres de plomo.

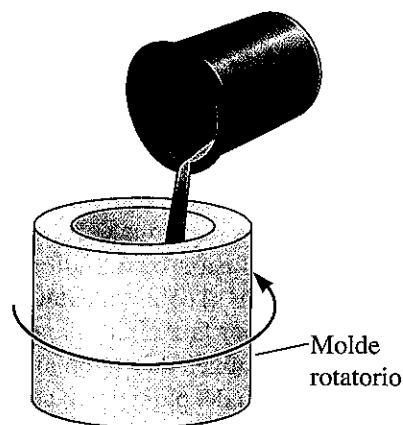
Ejemplo 11-7*Diseño de un componente cilíndrico ligero*

Diseñe un componente cilíndrico ligero que proporcione una resistencia al desgaste excelente en la pared interna, pero que siga teniendo ductilidad y tenacidad general razonables. Tal producto podría utilizarse como una camisa de cilindro en un motor de automóvil.

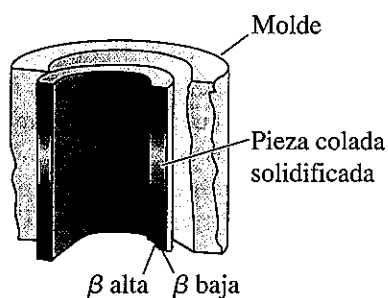
SOLUCIÓN

Muchas piezas resistentes al desgaste se producen a partir de aceros, los cuales tienen una densidad relativamente alta, pero las aleaciones hipereutécticas de Al-Si que contienen β primaria pueden proveer la resistencia al desgaste que se desea a un tercio el peso del acero.

Dado que la pieza tiene forma cilíndrica, el colado centrífugo (figura 11-22) podría ser el único método para producirla. En el colado centrífugo, se vierte el metal líquido



a)



b)

Figura 11-22

Colado centrífugo de una aleación hipereutéctica de Al-Si: a) se vierte la aleación líquida en un molde rotatorio y b) la pieza colada solidificada es hipereutéctica en el diámetro interno y eutéctica en el diámetro externo (para el ejemplo 11-7).

en un molde rotatorio y la fuerza centrífuga produce una forma hueca. Además, el material que tiene una densidad alta es enviado hacia la pared externa de la pieza colada, mientras que el material que tiene una densidad más baja que el líquido migra hacia la pared interna.

Cuando se cuela de manera centrífuga una aleación hipereutéctica de Al-Si, la fase β primaria nuclea y crece. La densidad de la fase β (si se supone que es la misma que la del Si puro) es, de acuerdo con el apéndice A, de 2.33 g/cm^3 , en comparación con una densidad de casi 2.7 g/cm^3 para el aluminio. A medida que las partículas de β primaria se precipitan del líquido, son enviadas a la superficie interna. El resultado es una pieza colada que está compuesto del microconstituyente eutéctico (con una ductilidad razonable) en la pared externa y de una composición hipereutéctica, que contiene grandes cantidades de β primaria, en la pared interna.

El Al-17% Si es una aleación común para producir componentes de aluminio para motores. A partir de la figura 11-19, la cantidad total de β primaria que puede formarse se calcula a 578°C , justo por arriba de la temperatura eutéctica:

$$\% \text{ de } \beta \text{ primaria} = \frac{17 - 12.6}{99.83 - 12.6} \times 100 = 5.0\%$$

Aunque sólo se espera que se forme 5.0% de β primaria, la acción centrífuga puede duplicar o triplicar la cantidad de β en la pared interna de la pieza colada.

11-6 Eutécticos y procesamiento de materiales

Muchos procesos de fabricación aprovechan la temperatura de fusión baja asociada con la reacción eutéctica. Las aleaciones de Pb-Sn son la base de una serie de aleaciones utilizadas para producir materiales de relleno para soldadura blanda (capítulo 9). Por ejemplo, si se desea unir una tubería de cobre, se pueden unir segmentos individuales introduciendo en la unión una aleación eutéctica de Pb-Sn con un punto de fusión bajo [figura 11-23a)]. El cobre se calienta justo por encima de la temperatura eutéctica. El cobre calentado funde la aleación de Pb-Sn, la cual es atraída hacia el espacio angosto por la acción capilar. Cuando la aleación de Pb-Sn se enfría y se solidifica, se une el cobre. También deben tomarse en cuenta la posibilidad de corrosión de tales tuberías y la introducción del plomo (Pb) en el agua.

Muchas aleaciones para colado también están basadas en aleaciones eutécticas. El líquido puede fusionarse y vaciarse en un molde a temperaturas bajas, reduciendo los costos de energía involucrados en la fundición, minimizando los defectos de la pieza colada como la porosidad gaseosa y previniendo reacciones entre el metal líquido y el molde. El hierro colado (capítulo 13) y muchas aleaciones de aluminio son aleaciones eutécticas.

Aunque la mayor parte de esta explicación se ha centrado alrededor de los materiales metálicos, es importante reconocer que los eutécticos también son muy importantes en muchos sistemas cerámicos (capítulo 15). La formación de eutécticos desempeñó una función en la formación exitosa de materiales parecidos a vidrios conocidos como fayenza egipcia. Las arenas del valle del río Nilo poseían cantidades considerables de piedra caliza (CaCO_3). Las cenizas de las plantas contienen cantidades considerables de óxido de potasio y sodio y se utilizan para que la arena se funda a temperaturas más bajas por la formación de los eutécticos.

La sílice y la alúmina son los materiales cerámicos más ampliamente empleados. La figura 11-23b) muestra un diagrama de fases para el sistema Al_2O_3 - SiO_2 . Observe el eutéctico a $\sim 1587^\circ\text{C}$. Las líneas discontinuas en este diagrama muestran las extensiones metaestables del liquidus y las zonas de miscibilidad metaestables. Como se mencionó antes, la existencia de estas zonas hace posible la fabricación de productos tecnológicamente útiles como los vidrios VycorTM y Pyrex[®]. El vidrio VycorTM se fabrica fundiendo (aproximadamente a 1500°C) primero la sílice (63%), el óxido de boro (27%), el óxido de sodio (7%) y la alúmina (3%). Después se moldea el vidrio en las formas deseadas. Durante la formación del vidrio, las fases vítreas se separan (debido a la zona de miscibilidad metaestable) en regiones ricas en óxido de boro y ricas en sílice. Las regiones ricas en óxido de boro se disuelven utilizando un ácido. El objeto poroso se sinteriza para formar el vidrio VycorTM que contiene 95%pe de sílice, 4% de óxido de boro y 1% de óxido de sodio. Sería muy difícil fabricar un vidrio alto en sílice como éste sin recurrir a la técnica descrita arriba. Los vidrios Pyrex[®] contienen alrededor de 80%pe de sílice, 13% de óxido de boro, 4% de óxido de sodio y 2% de alúmina. Se utilizan ampliamente en la fabricación de material para laboratorio (es decir, vasos de precipitado, etc.) y productos para el hogar.

La figura 11-23c) muestra un diagrama de fases binario para el sistema CaO - SiO_2 . Las composiciones conocidas como vidrio E o vidrio S se utilizan para fabricar las fibras que se introducen en los plásticos reforzados con fibras. Estos vidrios se fabrican fundiendo arena de sílice, piedra caliza y ácido bórico a alrededor de 1260°C . Después el vidrio se trefila en fibras. El vidrio E (la letra "E" es por "eléctrico", ya que el vidrio se fabricó originalmente para aislación eléctrica) contiene aproximadamente 52-56%pe de sílice, 12-16% de Al_2O_3 , 5-10% B_2O_3 , 0-5% de MgO , 0-2% de Na_2O y 0-2% de K_2O . El vidrio "S" (la letra "S" representa resistencia, en inglés *strength*) contiene aproximadamente un 65%pe de sílice, 12-25% de Al_2O_3 , 10% de MgO , 0-2% de Na_2O y 0-2% de K_2O .

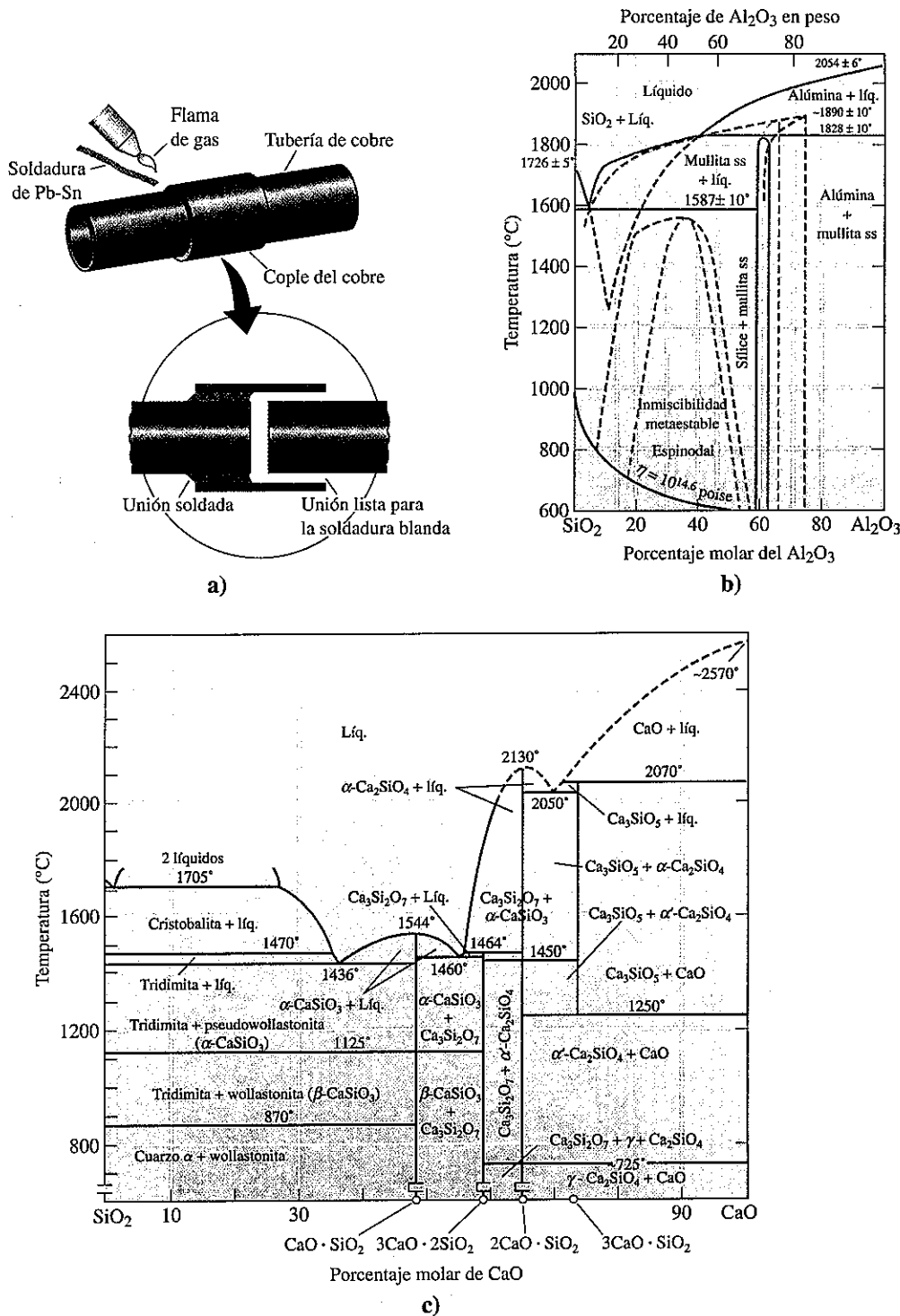


Figura 11-23 a) Con frecuencia se utiliza una aleación eutéctica de Pb-Sn durante la soldadura blanda para ensamblar piezas. Una fuente de calor, como una flama de gas, calienta las piezas y el material de relleno. El relleno es aspirado en la unión y se solidifica. b) Diagrama de fases para el $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. (Adaptado de *Introduction to Phase Equilibria in Ceramics*, por Bergeron, C. G. y Risbud, S. H., The American Ceramic Society, Inc., 1984, página 44.) c) Diagrama de fases para el sistema CaO-SiO_2 . (Adaptado de *Introduction to Phase Equilibria*, por C. G. Bergeron y S. H. Risbud, pp. 44 y 45, figs. 3-36 y 3-37. Copyright © 1984 American Ceramic Society. Adaptadas con permiso.)

11-7 Solidificación sin equilibrio en el sistema eutéctico

Suponga que tiene una aleación, como Pb-15% Sn, que por lo general se solidifica como una aleación de solución sólida. El último líquido se solidifica a casi 230 °C, muy por encima de la eutéctica; sin embargo, si la aleación se enfría demasiado rápido, se produce una curva de solidus sin equilibrio (figura 11-24). La fase α primaria continúa creciendo hasta que, justo por encima de 183 °C, el líquido sin equilibrio restante contiene 61.9% de Sn. Este líquido se transforma en el microconstituyente eutéctico, rodeando a la fase α primaria. Para las condiciones mostradas en la figura 11-24, la cantidad de eutéctico sin equilibrio es

$$\% \text{ del eutéctico} = \frac{15 - 10}{61.9 - 10} \times 100 = 9.6\%$$

Cuando se trata de manera térmica una aleación como la de Pb-15% Sn, se debe mantener la temperatura máxima por debajo de la temperatura eutéctica de 183 °C para prevenir la fragilidad en caliente o la fundición parcial (capítulo 10). Este concepto es muy importante en el endurecimiento por precipitación, o envejecimiento, de las aleaciones metálicas como las del sistema Al-Cu.

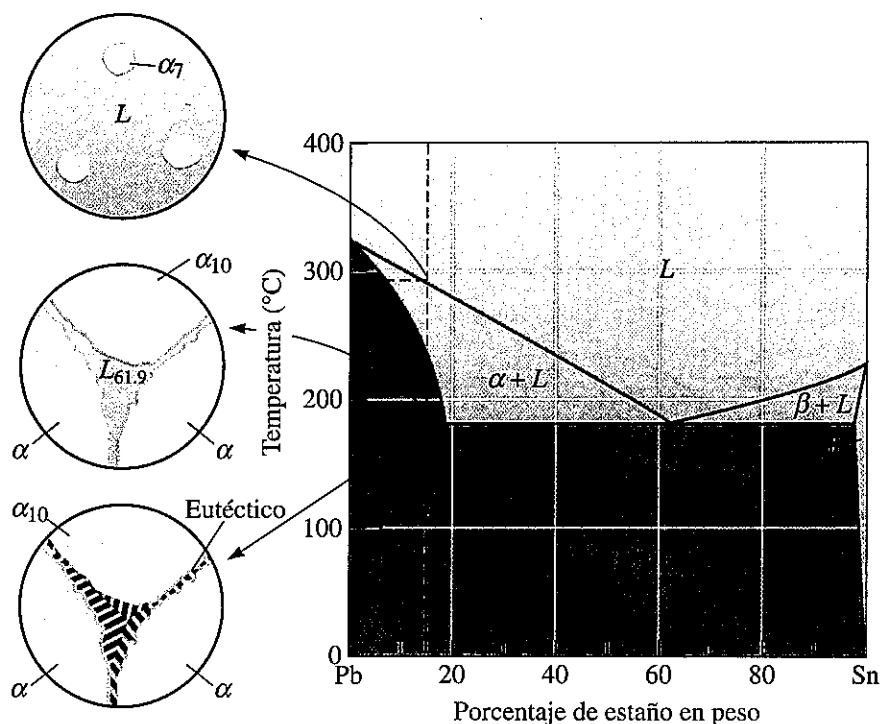


Figura 11-24 Solidificación sin equilibrio y microestructura de una aleación de Pb-15% Sn. Puede formarse un microconstituyente eutéctico sin equilibrio si la solidificación es demasiado rápida.

11-8 Nanoalambres y el diagrama de fases eutécticas

Los **nanoalambres** son cilindros o “alambres” de material con diámetro en el orden de 10 a 100 nm. Se ha generado un gran interés tecnológico en los nanoalambres debido a sus propiedades eléctricas, mecánicas, químicas y ópticas. Las aplicaciones potenciales incluyen sensores

biológicos y químicos y conductores eléctricos en dispositivos nanoelectrónicos. Un método de fabricación común de materiales en nanoalambres es a través de la técnica conocida como crecimiento de Vapor-Líquido-Sólido (VLS). El crecimiento de nanoalambres de silicio puede comprenderse considerando el diagrama de fases binario oro-silicio en la figura 11-25a). Observe que no hay una solubilidad mutua entre el oro y el silicio.

En un ejemplo del crecimiento de nanoalambres de silicio por VLS, la primera etapa es depositar una capa delgada de oro puro en un sustrato. Cuando se calienta el sustrato, el oro se desprende del sustrato o “se abulta”, formando una serie de nanopartículas de oro en la superficie del sustrato como se muestra en la figura 11-25b). Estas nanopartículas de oro, también conocidas como catalizadores de nanoalambres, actúan como la plantilla para el crecimiento de nanoalambres de silicio. El gas silano SiH_4 , el “vapor” en el proceso de VLS para el crecimiento de nanoalambres de silicio, fluye a través de una cámara que mantiene al sustrato con las nanopartículas de oro. El sustrato se calienta a una temperatura por encima de la temperatura eutéctica del oro-silicio de 363°C pero por debajo de la temperatura de

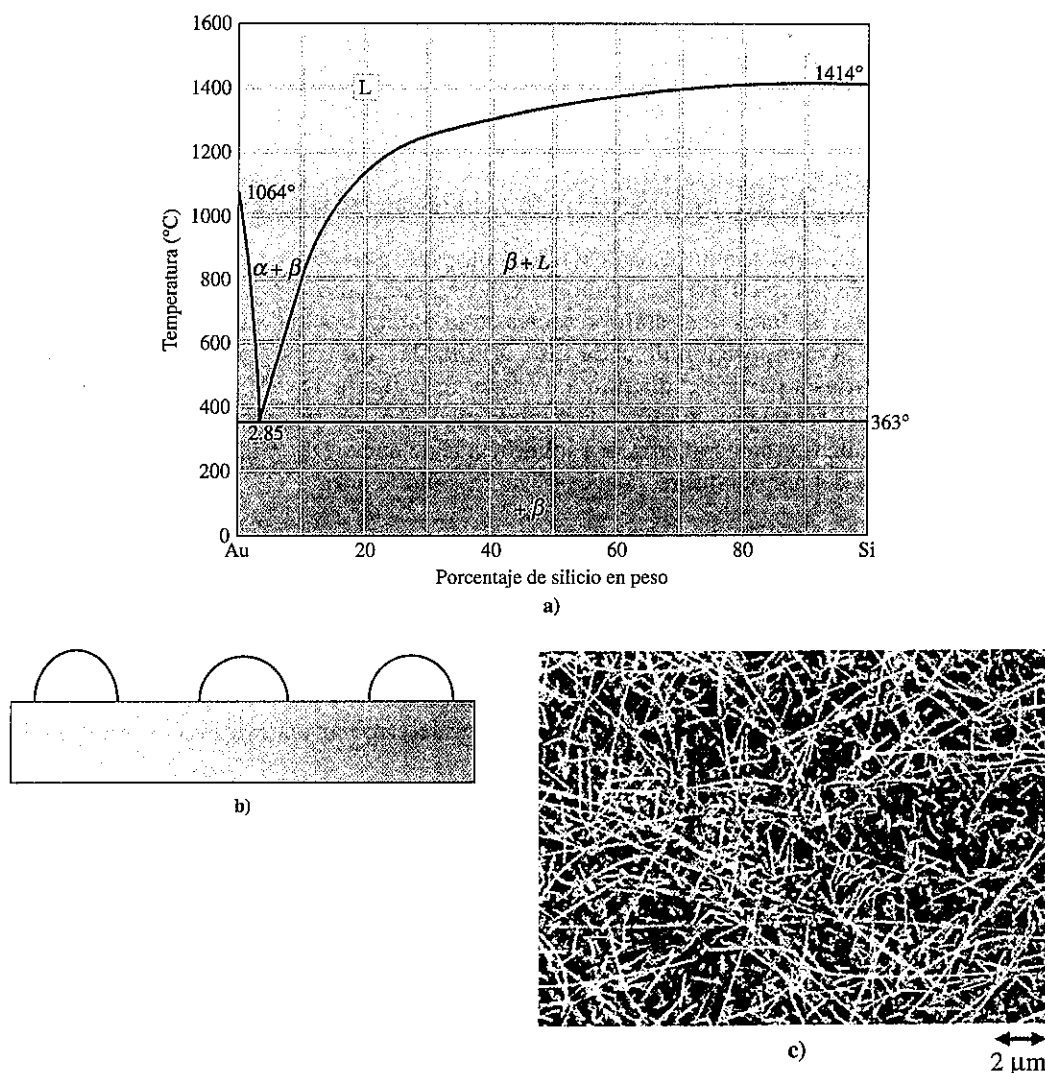


Figura 11-25 a) Diagrama de fases de Au-Si. b) Diagrama esquemático de las nanopartículas de Au en el sustrato. La representación no está a escala. c) Micrografía electrónica de barrido de los nanoalambres de silicio. (Figura reimpresa con permiso de “Diameter-Independent Kinetics in the Vapor-Liquid-Solid Growth of Si Nanowires” por S. Kodambaka, J. Tersoff, M. C. Reuter y F. M. Ross, en *Physical Review Letters* 96, p. 096105-2 (2006). Copyright 2006 por la American Physical Society.) (Cortesía de Wendelyn J. Wright.)

fusión del oro (1064 °C). El gas silano se descompone de acuerdo con $\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + 2\text{H}_2$. El silicio que se produce a partir de la descomposición del silano adsorbe las nanopartículas de oro y se difunde en ellas, ocasionando que comiencen a fundirse (formando por tanto el “líquido” del crecimiento de VLS). Las nanopartículas de oro se mantienen a una temperatura constante, se incrementa el contenido de silicio y la aleación de oro-silicio entra a una región de dos fases en el diagrama de fases de oro-silicio, como se muestra en la figura 11-25a). El silicio continúa difundiéndose en las nanopartículas de oro hasta que éstas se funden por completo. Las nanopartículas retienen su forma como bolas casi hemisféricas debido a las consideraciones superficie-energía entre las nanopartículas y el sustrato (piense en las gotas de aceite en una sartén con Teflón®). A medida que el contenido de silicio aumenta debido a la difusión del silicio en las nanopartículas, comienza a formarse una fase sólida. La fase sólida que se forma es el nanoalambre de silicio. Es silicio puro. El nanoalambre tiene el mismo diámetro que las nanopartículas de oro. La fase líquida que está presente se agrega encima del nanoalambre de silicio a medida que crece hacia arriba del sustrato. El nanoalambre continúa creciendo en longitud mientras se suministra gas silano al sustrato. Cuando se completa el crecimiento del nanoalambre, se reduce la temperatura y la fase sólida encima del nanoalambre se solidifica al enfriarse a través de la temperatura eutéctica. En la figura 11-25c) se muestran los nanoalambres de silicio.

Ejemplo 11-8

Crecimiento de nanoalambres de silicio

Considere que se mantienen a 600 °C nanopartículas de oro (Au) en un sustrato de silicio (Si) sobre el que fluye gas silano. a) Cuando una nanopartícula consiste en 1%pe de Si, describa las fases que están presentes en la nanopartícula, la cantidad relativa de cada fase y la composición de cada fase. Realice las aproximaciones de las composiciones necesarias a partir del diagrama de fases en la figura 11-25a). b) ¿A qué porcentaje del silicio se funde por completo la nanopartícula? c) ¿A qué porcentaje del silicio la nanopartícula fundida comenzará a solidificarse de nuevo? d) ¿Cuáles son las composiciones finales del nanoalambre y del catalizador solidificado?

SOLUCIÓN

a) La nanopartícula consiste en una fase sólida y una líquida a 1%pe de Si. El sólido es 100% de Au. De acuerdo con la figura 11-25a) el líquido contiene aproximadamente un 2.4%pe de Si y 97.6%pe de Au. (El %pe del silicio debe ser menor a 2.85% de acuerdo con el punto eutéctico en el diagrama de fases.)

Utilizado la regla de la palanca para determinar las cantidades relativas de cada fase:

$$\% \text{ del sólido} = \frac{2.4 - 1.0}{2.4 - 0} = 58\% \quad \% \text{ del líquido} = \frac{1.0 - 0}{2.4 - 0} = 42\%$$

Por tanto, la nanopartícula consiste en 58% sólido (100% de Au) y 42% líquido (%pe de 2.4 Si y %pe de 97.6 Au).

b) La isla se fundirá por completo cuando el contenido de silicio alcance aproximadamente un %pe de 2.4.

c) La isla comenzará a solidificarse de nuevo cuando el contenido de silicio alcance aproximadamente un %pe de 7.

d) La fase sólida es de 100% de Si. La fase líquida es de aproximadamente 7%pe de Si y 97%pe de Au.

Resumen

- Al producir un material que contiene dos o más fases, se obtiene endurecimiento por dispersión. En los materiales metálicos, el límite entre las fases impide el movimiento de las dislocaciones y mejora la resistencia. La introducción de múltiples fases puede proveer otros beneficios, incluyendo la mejora de la tenacidad a la fractura de las cerámicas y los polímeros.
- Para un endurecimiento por dispersión óptimo, en particular en los materiales metálicos, debe formarse un gran número de partículas pequeñas y duras dispersadas de manera discontinua en una matriz blanda y dúctil para proveer los obstáculos más efectivos para las dislocaciones. Las partículas redondas de la fase dispersa minimizan las concentraciones de esfuerzos y las propiedades finales de la aleación pueden ser controladas por las cantidades relativas de éstas y la matriz.
- Los compuestos intermetálicos, los cuales por lo general son resistentes y quebradizos, con frecuencia se introducen como fases dispersas.
- Los diagramas de fases para materiales que contienen múltiples fases por lo general contienen una o más reacciones de tres fases.
- La reacción eutéctica permite que el líquido se solidifique como una mezcla íntima de dos fases. Al controlar el proceso de solidificación, se puede lograr un intervalo amplio de propiedades. Algunos de los factores que pueden controlarse incluyen el tamaño de los granos o los espaciamientos de las ramas de dendritas secundarias de los microconstituyentes primarios, el tamaño de las colonias del microconstituyente eutéctico, el espaciamiento interlaminar dentro del microconstituyente eutéctico, la microestructura, o forma, de las fases dentro del microconstituyente eutéctico y la cantidad del microconstituyente eutéctico que se forma.
- Las reacciones eutectoides ocasionan que un sólido se transforme en una mezcla de otros dos sólidos. Como se muestra en el siguiente capítulo, los tratamientos térmicos para controlar la reacción eutectoide proveen una base excelente para el endurecimiento por dispersión.
- Pueden crearse nanoalambres a partir de sistemas eutécticos a través de un proceso conocido como crecimiento de Vapor-Líquido-Sólido (VLS). En un ejemplo del crecimiento de VLS de nanoalambres de silicio, se pasa gas silano sobre catalizadores de oro. El silicio se deposita en el oro, formando un sistema binario. A medida que la concentración del silicio aumenta, los catalizadores se funden y a medida que la concentración del silicio se incrementa más, se forma una fase sólida la cual es el nanoalambre de silicio. El diámetro de los nanoalambres se controla por medio del diámetro del catalizador y la longitud de los nanoalambres se controla por medio del tiempo de crecimiento.

Glosario

Aleación hipereutéctica Composición de una aleación entre la del extremo derecho de la línea de interconexión que define la reacción eutéctica y la composición eutéctica.

Aleación hipoeutéctica Composición de una aleación entre la del extremo izquierdo de la línea de interconexión que define la reacción eutéctica y la composición eutéctica.

Compuesto intermetálico Compuesto conformado por dos o más metales que tiene su propia composición, estructura y propiedades únicas.

Compuesto intermetálico estequiométrico Fase formada por la combinación de dos componentes en un compuesto que tiene una estructura y propiedades diferentes a la de cualquier componente. El compuesto intermetálico estequiométrico tiene una razón fija de los componentes presentes en el compuesto.

Compuesto intermetálico no estequiométrico Fase formada por la combinación de dos componentes en un compuesto que tiene una estructura y propiedades diferentes de las de los componentes. El compuesto no estequiométrico tiene una razón variable de los componentes presentes en el compuesto (véase también solución sólida intermedia).

Endurecimiento por dispersión Incrementa la resistencia de un material formando más de una fase. Pueden obtenerse excelentes combinaciones de propiedades controlando de manera apropiada el tamaño, la forma, la cantidad y las propiedades individuales de las fases.

Endurecimiento por envejecimiento Mecanismo de endurecimiento que depende de una secuencia de transformaciones de fase de estado sólido en la generación de una dispersión de partículas ultrafinas de una segunda fase. El endurecimiento por envejecimiento es una forma del endurecimiento por dispersión. También se le llama endurecimiento por precipitación (capítulo 12).

Endurecimiento por precipitación Mecanismo de endurecimiento que depende de una secuencia de transformaciones de la fase de estado sólido en la generación de una dispersión de precipitados ultrafinos de una segunda fase (capítulo 12). Es una forma de endurecimiento por dispersión. También llamado endurecimiento por envejecimiento.

Espaciamento interlaminar Distancia entre el centro de una lámina o placa de una fase y el centro de la lámina o placa adyacente de la misma fase.

Estudio isoplethal Determinación de las reacciones y los cambios microestructurales que se esperan mientras se estudia una composición química en particular en un sistema.

Eutéctica Reacción invariante de tres fases en la que una fase líquida se solidifica para producir dos fases sólidas.

Eutectoide Reacción invariante de tres fases en la que una fase sólida se transforma en dos fases sólidas distintas.

Fase dispersa Fase sólida que se forma a partir de la fase de la matriz original cuando se excede el límite de solubilidad.

Hiper- Prefijo que indica que la composición de una aleación es mayor que la composición a la que ocurre la reacción de tres fases.

Hipo- Prefijo que indica que la composición de una aleación es menor que la composición a la que ocurre la reacción de tres fases.

Interfaz de interfases Límite entre dos fases en una microestructura. En los materiales metálicos, este límite resiste el movimiento de las dislocaciones y provee endurecimiento por dispersión y endurecimiento por precipitación.

Isopleta Línea en un diagrama de fases que muestra una composición química constante.

Lámina Placa delgada de una fase que se forma durante ciertas reacciones entre tres fases, como la eutéctica o la eutectoide.

Matriz Fase sólida continua en una microestructura compleja. Pueden formarse dentro de la matriz partículas de la fase sólida dispersa.

Microconstituyente Fase o mezcla de fases en una aleación que tiene una apariencia distinta. Con frecuencia, se describe una microestructura en términos de los microconstituyentes en vez de en las fases reales.

Microconstituyente eutéctico Mezcla característica de dos fases formada como resultado de la reacción eutéctica.

Microconstituyente primario Microconstituyente que se forma antes de que comience una reacción entre tres fases. También llamado microconstituyente proeutéctico.

Modificación Adición de elementos de aleación, como sodio o estroncio, la cual cambia la microestructura del microconstituyente eutéctico en las aleaciones de aluminio-silicio.

Monotéctica Reacción de tres fases en la que un líquido se transforma en un sólido y en un segundo líquido en el enfriamiento.

Nanoalambres Cilindros o "alambres" del material con diámetros en el orden de 10 a 100 nm.

Peritéctica Reacción de tres fases en la que un sólido y un líquido se combinan para producir un segundo sólido en el enfriamiento.

Peritectoide Reacción de tres fases en la que dos sólidos se combinan para formar un tercer sólido en el enfriamiento.

Precipitado Fase sólida que se forma a partir de la fase de la matriz original cuando se excede el límite de solubilidad. Con frecuencia se emplea el término precipitado como opuesto a las partículas de la fase dispersa para las aleaciones formadas por el endurecimiento por precipitación o envejecimiento. En la mayoría de los casos, se trata de controlar la formación de las partículas precipitadas de la segunda fase para producir el endurecimiento por dispersión o en endurecimiento por envejecimiento óptimo. (También llamado fase dispersa.)

Solución sólida intermedia Compuesto intermetálico no estequiométrico que muestra un intervalo de composiciones.

Solvus Curva de solubilidad que separa una región de una sola fase sólida de una región de dos fases sólidas en el diagrama de fases.

Zona de miscibilidad Región en un diagrama de fases en la que dos fases, en esencia con la misma estructura, no se mezclan, o no tienen solubilidad entre sí.

Zona de miscibilidad metaestable Zona de miscibilidad que se extiende por debajo del liquidus o existe por completo por debajo del liquidus. Dos líquidos que son inmiscibles continúan existiendo como líquidos y permanecen sin mezclarse. Estos sistemas forman la base para los vidrios Vycor™ y Pyrex®.

Problemas

Sección 11-1 Principios y ejemplos del endurecimiento por dispersión

- 11-1** ¿Cuáles son los requerimientos de una matriz y un precipitado para que el endurecimiento por dispersión sea efectivo?

Sección 11-2 Compuestos intermetálicos

- 11-2** ¿Qué es un compuesto intermetálico? ¿En qué difiere de otros compuestos? Por ejemplo, aparte de la diferencia obvia en composición, ¿en qué difiere el TiAl del Al_2O_3 ?
- 11-3** Explique de manera clara las dos maneras distintas en las que pueden utilizarse los compuestos intermetálicos.
- 11-4** ¿Cuáles son algunos de los problemas principales en el uso de intermetálicos para aplicaciones a temperaturas altas?

Sección 11-3 Diagramas de fases que contienen reacciones de tres fases

- 11-5** Defina los términos reacciones eutécticas, eutectoides, peritéticas, peritectoides y monotéticas.
- 11-6** ¿Qué es una reacción invariante? Demuestre que para un sistema de dos componentes el número de grados de libertad para una reacción invariante es cero.
- 11-7** En la figura 11-26 se muestra un diagrama de fases hipotético.

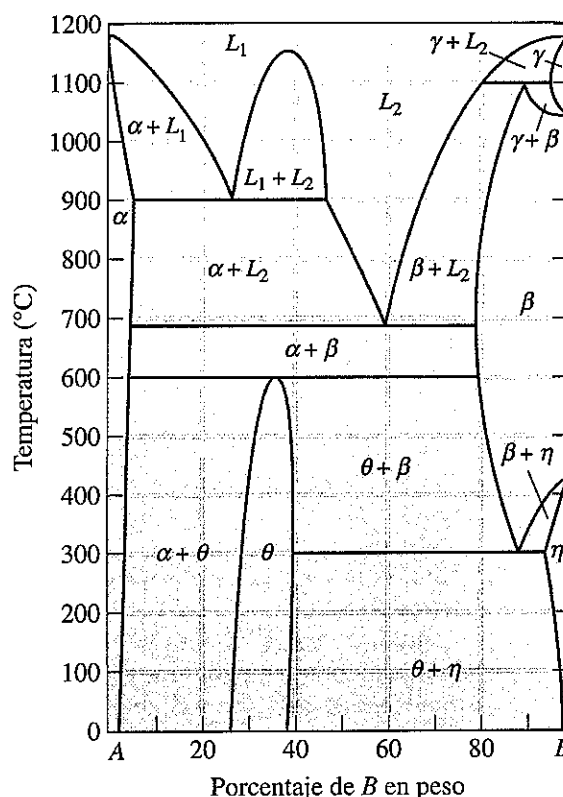


Figura 11-26 Diagrama de fases hipotético (para el problema 11-7).

- a) ¿Hay compuestos intermetálicos presentes? Si los hay, identifíquelos y determine

- si son estequiométricos o no estequiométricos.
- b) Identifique las soluciones sólidas presentes en el sistema. ¿Es alotrópico el material A o B? Explique.
- c) Identifique las reacciones de tres fases escribiendo la temperatura, la reacción en forma de ecuación, la composición de cada fase en la reacción y el nombre de la reacción.

11-8 En la figura 11-27 se muestra un diagrama de fases de Cu-Zn.

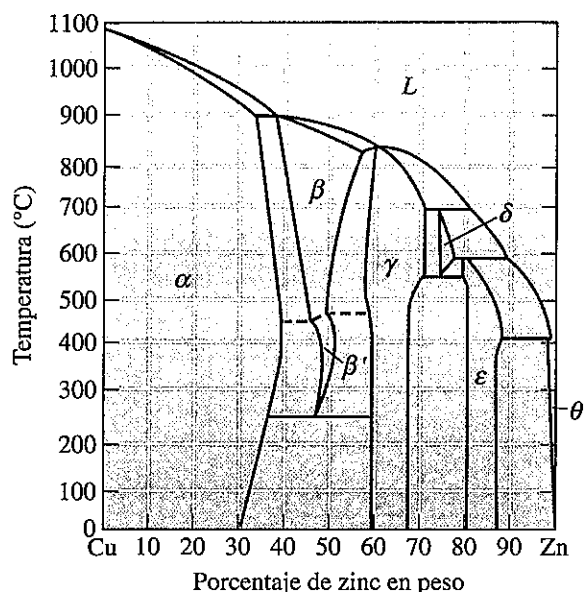


Figura 11-27 Diagrama de fases de cobre-zinc (para el problema 11-8).

- a) ¿Hay compuestos intermetálicos presentes? Si los hay, identifíquelos y determine si son estequiométricos o no estequiométricos.
- b) Identifique las soluciones sólidas presentes en el sistema.
- c) Identifique las reacciones de tres fases escribiendo la temperatura, la reacción en forma de ecuación y el nombre de la reacción.

11-9 En la figura 11-28 se muestra un diagrama de fases de Al-Li.

- a) ¿Hay compuestos intermetálicos presentes? Si los hay, identifíquelos y determine si son estequiométricos o no estequiométricos. Determine la fórmula para cada compuesto.

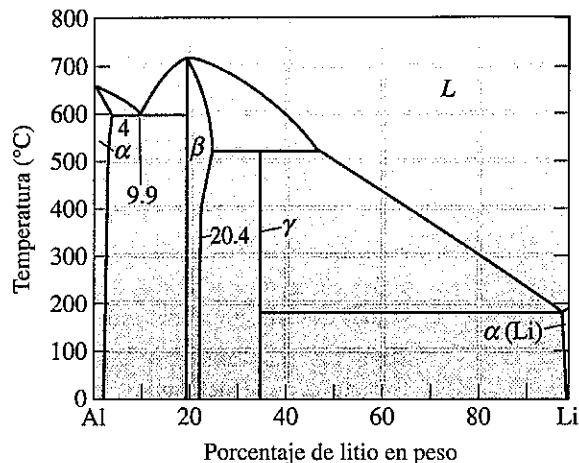


Figura 11-28 Diagrama de fases de aluminio-litio (para los problemas 11-9 y 11-25).

- b) Identifique las reacciones de tres fases escribiendo la temperatura, la reacción en forma de ecuación, la composición de cada fase en la reacción y el nombre de la reacción.

11-10 Se encuentra un compuesto intermetálico para 38%pe de Sn en el diagrama de fases de Cu-Sn. Determine la fórmula para el compuesto.

11-11 Se encuentra un compuesto intermetálico para 10%pe de Si en el diagrama de fases de Cu-Si. Determine la fórmula para el compuesto.

Sección 11-4 Diagrama de fases eutéctico

11-12 Considere una aleación de Pb-15% Sn. Durante la solidificación, determine

- la composición del primer sólido a formarse;
- la temperatura de liquidus, la temperatura de solidus, la temperatura de solvus y el intervalo de solidificación de la aleación;
- las cantidades y las composiciones de cada fase a 260 °C;
- las cantidades y las composiciones de cada fase a 183 °C, y
- las cantidades y las composiciones de cada fase a 25 °C.

11-13 Considere una aleación de Al-12% Mg (figura 11-29). Durante la solidificación, determine

- la composición del primer sólido a formarse;
- la temperatura de liquidus, la temperatura de solidus, la temperatura de solvus y el intervalo de solidificación de la aleación;

- c) las cantidades y las composiciones de cada fase a 525 °C;
- d) las cantidades y las composiciones de cada fase a 450 °C, y
- e) las cantidades y las composiciones de cada fase a 25 °C.

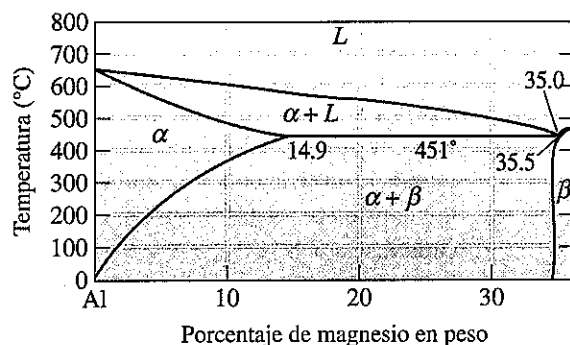


Figura 11-29 Porción del diagrama de fases de aluminio-magnesio (para los problemas 11-13 y 11-26).

11-14 Considere una aleación de Pb-35% Sn. Determine

- a) si la aleación es hipoeutéctica o hipereutéctica;
- b) la composición del primer sólido a formarse durante la solidificación;
- c) las cantidades y las composiciones de cada fase a 184 °C;
- d) las cantidades y las composiciones de cada fase a 182 °C;
- e) las cantidades y las composiciones de cada microconstituyente a 182 °C, y
- f) las cantidades y las composiciones de cada fase a 25 °C.

11-15 Considere una aleación de Pb-70% Sn. Determine

- a) si la aleación es hipoeutéctica o hipereutéctica;
- b) la composición del primer sólido a formarse durante la solidificación;
- c) las cantidades y las composiciones de cada fase a 184 °C;
- d) las cantidades y las composiciones de cada fase a 182 °C;
- e) las cantidades y las composiciones de cada microconstituyente a 182 °C, y
- f) las cantidades y las composiciones de cada fase a 25 °C.

11-16 a) Dibuje un diagrama de fases eutéctico común con los componentes A y B que tienen puntos de fusión similares. B es mucho más soluble en A (máxima = 15%) que lo que es A en B (máxima = 5%) y la composición

eutéctica ocurre cerca de 40% B. La temperatura eutéctica es 2/3 del punto de fusión. Etiquete los ejes del diagrama. Etiquete todas las fases. Utilice α y β para indicar las fases sólidas. b) Para una composición general de 60% B, liste la secuencia de las fases encontradas a medida que el líquido se enfría de manera lenta a temperatura ambiente.

11-17 En la figura 11-30 se muestra el diagrama de fases de cobre-plata. El cobre tiene un punto de fusión mayor que la plata. Refiérase a la fase sólida rica en plata como gama (γ) y a la fase sólida rica en cobre como delta (δ). Indique el líquido como L.

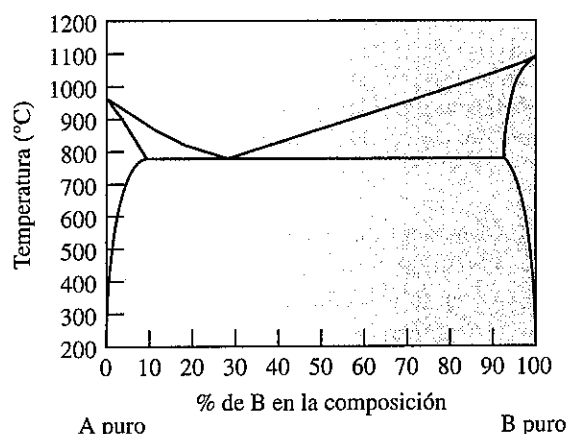


Figura 11-30 Diagrama de fases para los elementos A y B (para el problema 11-17).

- a) Para una composición total de 60% B (40% A) a una temperatura de 800 °C. ¿cuáles son las composiciones y las cantidades de las fases presentes?
- b) Para una composición total de 30% B (70% A) a una temperatura de 1000 °C. ¿cuáles son las composiciones y las cantidades de las fases presentes?
- c) Dibuje un diagrama esquemático que ilustre la microestructura final de un material con una composición de 50% B (50% A) enfriado a 200 °C desde el estado líquido. Etiquete cada fase presente.

11-18 Calcule el porcentaje total de β y el porcentaje del microconstituyente eutéctico a temperatura ambiente para las siguientes aleaciones de plomo estaño: 10% de Sn, 20% de Sn, 50% de Sn, 60% de Sn, 80% de Sn y 95% de Sn. Utilizando la figura 11-18, grafique la resistencia de las aleaciones en función de los porcentajes de β y del eutéctico y explique sus gráficas.

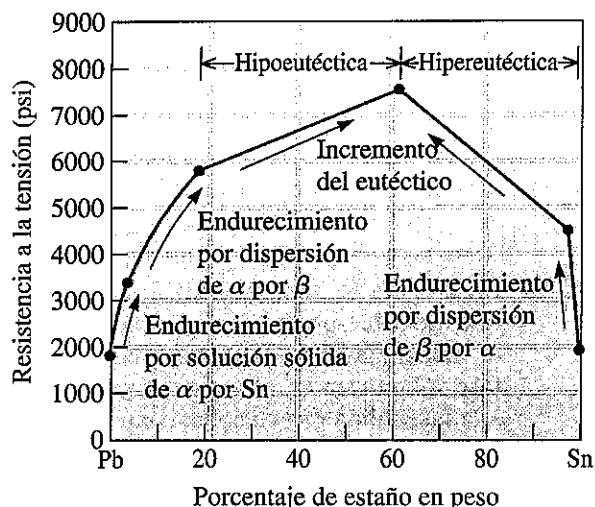


Figura 11-18 (Repetida para el problema 11-18.) Efecto de la composición y del mecanismo de endurecimiento sobre la resistencia a la tensión de las aleaciones de plomo-estaño.

11-19 Considere una aleación de Al-4% Si (figura 11-19). Determine

- si la aleación es hipoeutéctica o hipereutéctica;
- la composición del primer sólido a formarse durante la solidificación;
- las cantidades y las composiciones de cada fase a 578 °C;

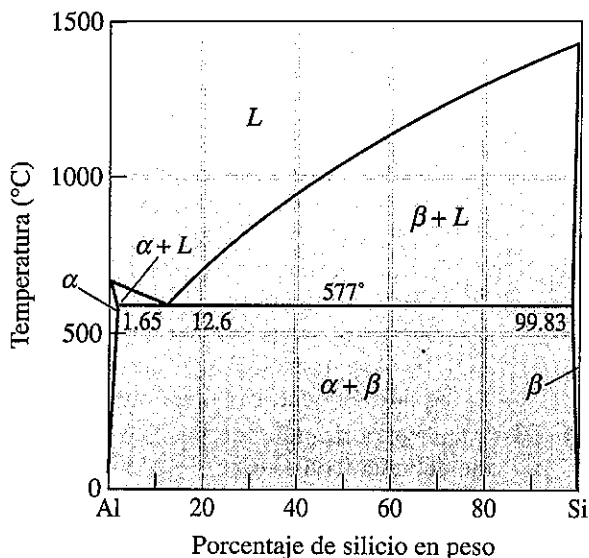


Figura 11-19 (Repetida para los problemas 11-19 y 11-20 y 11-29.) Diagrama de fases de aluminio-silicio.

- las cantidades y las composiciones de cada fase a 576 °C, las cantidades y las composiciones de cada microconstituyente a 576 °C, y
- las cantidades y las composiciones de cada fase a 25 °C.

11-20 Considere una aleación de Al-25% Si (figura 11-19). Determine

- si la aleación es hipoeutéctica o hipereutéctica;
- la composición del primer sólido a formarse durante la solidificación;
- las cantidades y las composiciones de cada fase a 578 °C;
- las cantidades y las composiciones de cada fase a 576 °C;
- las cantidades y las composiciones de cada microconstituyente a 576 °C, y
- las cantidades y las composiciones de cada fase a 25 °C.

11-21 Una aleación de Pb-Sn contiene 45% α y 55% β a 100 °C. Determine la composición de la aleación. ¿La aleación es hipoeutéctica o hipereutéctica?

11-22 Una aleación de Al-Si contiene 85% de α y 15% de β a 500 °C. Determine la composición de la aleación. ¿La aleación es hipoeutéctica o hipereutéctica?

11-23 Una aleación de Pb-Sn contiene 23% de α primaria y 77% del microconstituyente eutéctico inmediatamente después que se ha completado la reacción eutéctica. Determine la composición de la aleación.

11-24 Una aleación de Al-Si contiene 15% de β primaria y 85% del microconstituyente eutéctico inmediatamente después que se ha completado la reacción eutéctica. Determine la composición de la aleación.

11-25 La observación de una microestructura muestra que hay 28% eutéctico y 72% β primaria en una aleación de Al-Li. (figura 11-28). Determine la composición de la aleación y si es hipoeutéctica o hipereutéctica.

11-26 Escriba la reacción eutéctica que ocurre, incluyendo las composiciones de las tres fases en equilibrio, y calcule la cantidad de α y β en el microconstituyente eutéctico en el sistema Mg-Al (figura 11-29).

11-27 Calcule la cantidad total de α y β y la cantidad de cada microconstituyente en una aleación de Pb-50% Sn a 182 °C. ¿Qué fracción del total de α en la aleación está contenida en el microconstituyente eutéctico?

11-28 La figura 11-31 muestra una curva de enfriamiento para una aleación de Pb-Sn. Determine

- la temperatura del vertido;
- el sobrecalentamiento;
- la temperatura de liquidus;
- la temperatura eutéctica;
- el intervalo de solidificación;
- el tiempo de solidificación local;
- el tiempo de solidificación total, y
- la composición de la aleación.

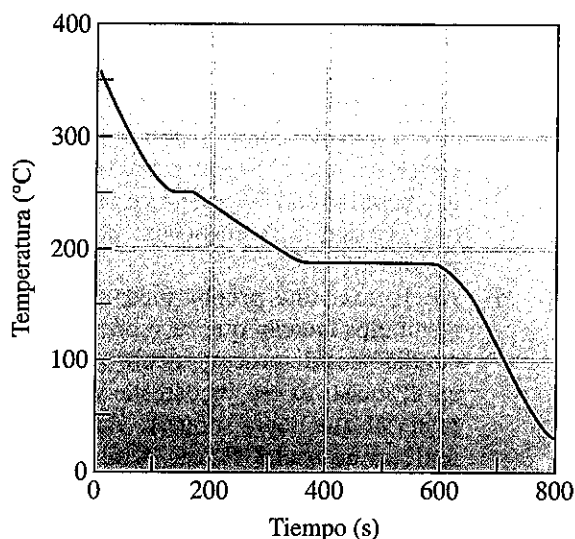


Figura 11-31 Curva de enfriamiento para una aleación de Pb-Sn (para el problema 11-28).

11-29 La figura 11-32 muestra una curva de enfriamiento para una aleación de Al-Si y la figura 11-19 muestra el diagrama de fases binario para este sistema. Determine

- la temperatura del vertido;
- el sobrecalentamiento;
- la temperatura de liquidus;
- la temperatura eutéctica;
- el intervalo de solidificación;
- el tiempo de solidificación local;
- el tiempo de solidificación total, y
- la composición de la aleación.

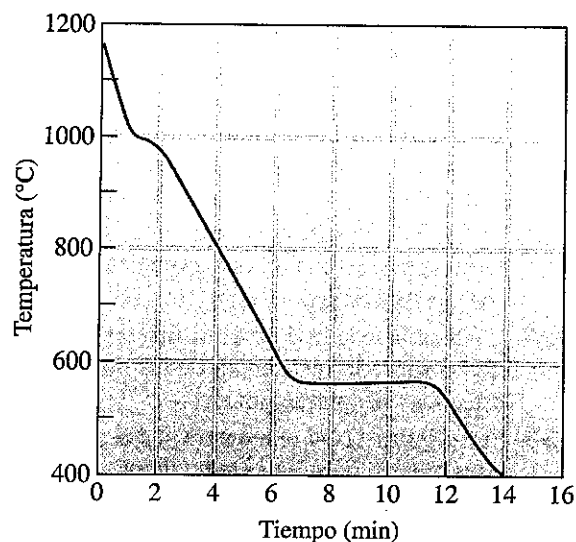


Figura 11-32 Curva de enfriamiento para una aleación de Al-Si (para el problema 11-29).

11-30 Trace las curvas de enfriamiento, incluyendo las temperaturas apropiadas, esperadas para las siguientes aleaciones de Al-Si:

- Al-4% Si;
- Al-12.6% Si;
- Al-25% Si, y
- Al-65% Si.

11-31 Se obtienen curvas de enfriamiento a partir de una serie de aleaciones de Cu-Ag (figura 11-33). Utilice esta información para producir el diagrama de fases de Cu-Ag. La solubilidad máxima de Ag en Cu es del 7.9% y la solubilidad máxima de Cu en Ag es del 8.8%. Las solubilidades a temperatura ambiente son casi cero.

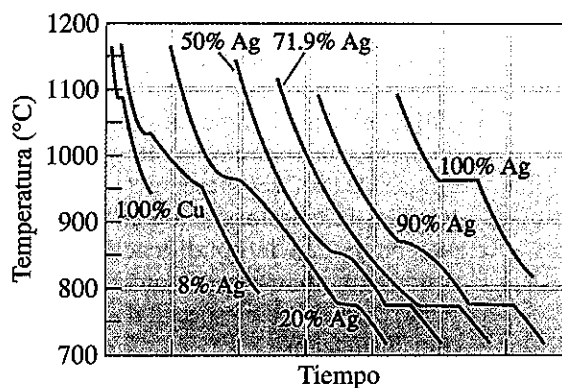


Figura 11-33 Curvas de enfriamiento para una serie de aleaciones de Cu-Ag (para el problema 11-31).

Sección 11-5 Resistencia de las aleaciones eutécticas

- 11-32** En relación con las aleaciones eutécticas, ¿qué significa el término “modificación”? ¿Cómo ayuda a las propiedades de la aleación?
- 11-33** Para el sistema Pb-Sn, explique por qué la resistencia a la tensión es máxima en la composición eutéctica.
- 11-34** ¿La forma de la fase proeutéctica tiene algún efecto sobre la resistencia de las aleaciones eutécticas? Explique por qué.
- 11-35** En la figura 11-34 se muestra el diagrama de fases binario para un sistema de plata (Ag) y germanio (Ge).

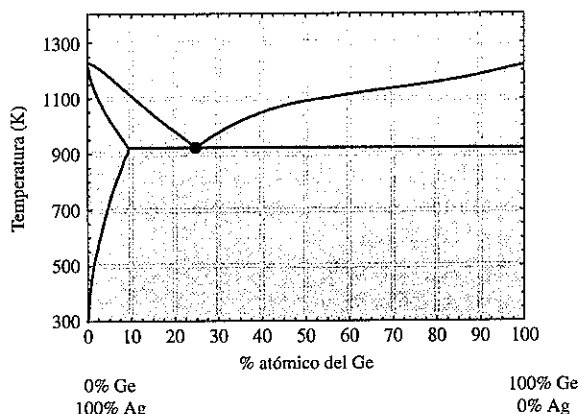


Figura 11-34 Diagrama de fases de plata-germanio (para el problema 11-35).

- Dibuje de manera esquemática el diagrama de fases y etiquete las fases presentes en cada región en el diagrama. Indique α como la fase sólida rica en Ag y β como la fase sólida rica en Ge. Utilice L para indicar la fase líquida.
- Para una composición total de 80% Ge (20% Ag) a una temperatura de 700 K, ¿cuáles son las composiciones y las cantidades de las fases presentes?
- ¿Cuál es la transformación en las fases que ocurre en la solidificación de la fusión al punto marcado con un círculo? ¿Cuál es el nombre especial dado a esta transformación?
- Dibuje un diagrama esquemático que ilustre la microestructura final de 15% Ge (85% Ag) enfriada de manera lenta a 300 K desde el estado líquido.
- Considere dos muestras de tensión a temperatura ambiente. Una es Ag pura

y una es Ag con 2% de Ge, ¿cuál muestra esperaría que fuera más resistente?

- 11-36** En la figura 11-35 se muestra un diagrama de fases de cobre-plata. El cobre tiene un punto de fusión más alto que la plata.
- ¿El cobre es el elemento A o el elemento B etiquetados en el diagrama de fases?
 - Dibuje de manera esquemática el diagrama de fases y etiquete todas las fases presentes en cada región (de una sola fase y de dos fases) del diagrama de fases escribiéndolas de manera directa en su representación. Indique la fase sólida rica en plata como gamma (γ) y la fase sólida rica en cobre como delta (δ). Indique el líquido como L .
 - A 600 °C, la solución sólida del elemento A en el elemento B es más resistente que la solución sólida del elemento B en el elemento A. Suponga condiciones de procesamiento similares. ¿Es probable que un material enfriado de líquido a 600 °C con una composición de 90% A y 10% B sea más resistente o más débil que un material con la composición eutéctica? Explique su respuesta por completo.
 - Al efectuar una prueba mecánica, sus resultados indican que su suposición de condiciones de procesamiento similares en el inciso c) era incorrecta y que el material que había supuesto más resistente es de hecho el más débil. Dé un ejemplo de una condición de procesamiento y una descripción de la microestructura asociada que pudieran haber conducido a esta discrepancia.

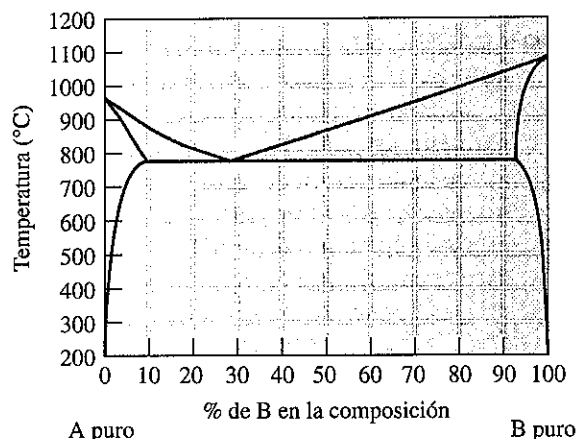


Figura 11-35 Diagrama de fases para los elementos A y B (para el problema 11-36).

Sección 11-6 Eutéticos y procesamiento de materiales

- 11-37** Explique por qué se emplean aleaciones de Pb-Sn para la soldadura blanda.
- 11-38** Los refractarios utilizados en la fabricación de acero incluyen ladrillos de sílice que contienen niveles muy pequeños de alúmina (Al_2O_3). La temperatura eutéctica en este sistema es de alrededor de 1587°C . La sílice se funde a alrededor de 1725°C . Explique qué le sucederá a la capacidad de soporte de carga de los ladrillos si se incorpora una cantidad pequeña de alúmina a los ladrillos de sílice.
- 11-39** El diagrama de fases de Fe- Fe_3C exhibe un eutéctico cerca de la composición utilizada para los hierros colados. Explique por qué es benéfico para las aleaciones ferrosas utilizadas para colar piezas tener un punto eutéctico.

Sección 11-7 Solidificación sin equilibrio en el sistema eutéctico

- 11-40** ¿Qué es fragilidad en caliente? ¿Cómo afecta a la temperatura a la que pueden utilizarse las aleaciones eutécticas?

Sección 11-8 Nanoalambres y el diagrama de fases eutéctico

- 11-41** Explique el mecanismo de vapor-líquido-sólido del crecimiento de nanoalambres.

Problemas de diseño

- 11-42** Diseñe un método de procesamiento que permita que una aleación de Pb-15% Sn se solidifique en condiciones sin equilibrio para que se trabaje en caliente.
- 11-43** Diseñe un proceso de adhesión por difusión eutéctica para unir aluminio con silicio.

Describa los cambios en la microestructura en la interfaz durante el proceso de adhesión.

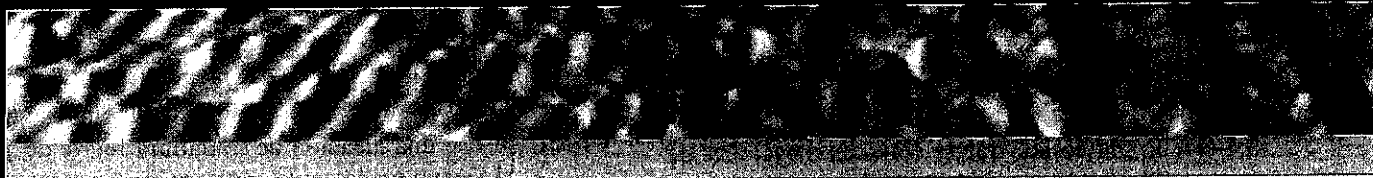
- 11-44** Diseñe una aleación de soldadura fuerte de Al-Si y un proceso que una de manera exitosa una aleación de Al-Mn que tiene una temperatura de liquidus de 659°C y una temperatura de solidus de 656°C . La soldadura fuerte, como la soldadura blanda, involucra la introducción de un metal de relleno líquido en una unión sin fundir los metales que se están uniendo.

Problemas de cómputo

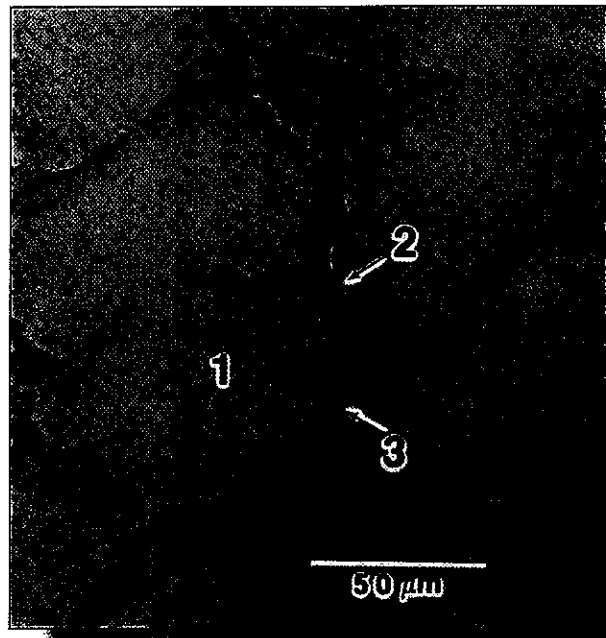
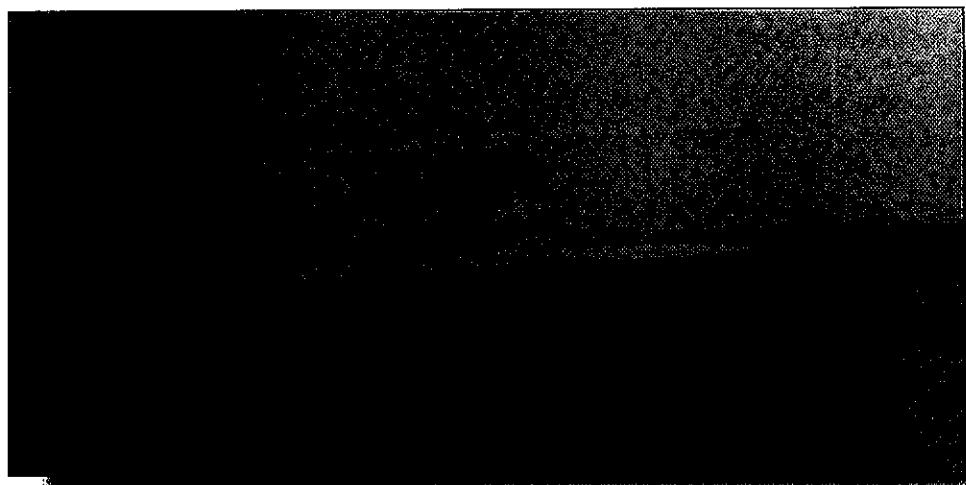
- 11-45** Escriba un programa de cómputo que le asista en la resolución de problemas como los ilustrados en los ejemplos 11-2 u 11-3. La entrada será, por ejemplo, la composición en volumen de la aleación, la masa de la aleación y las masas atómicas de los elementos (o compuestos) que conforman el sistema binario. El programa debe pedirle al usuario que provea la temperatura, el número de fases y la composición de las fases. El programa debe proveerle al usuario las salidas de las fracciones de las fases presentes y las masas totales de las fases, al igual que la masa de cada elemento en las diferentes fases. Comience con un programa que le provea una solución para el ejemplo 11-3 y después extiéndalo al ejemplo 11-4.

Knovel® Problemas

- K11-1** Encuentre un diagrama de fases de hierro-titanio e identifique las temperaturas y las composiciones de la aleación binaria para los puntos de las tres fases para todas las reacciones eutécticas.



© John T. Daniel.



El 17 de diciembre de 1903, los hermanos Wright volaron el primer avión controlable. El histórico primer vuelo duró sólo 12 segundos y cubrió 120 pies, pero cambió al mundo para siempre. También se muestra la micrografía de la aleación utilizada en el avión de los hermanos Wright. (Cortesía del doctor Frank Gayle, NTST) ¡Lo que no se sabía en ese entonces era que el motor de aleación de aluminio que utilizaron se endureció de manera inadvertida por precipitación!

Endurecimiento por dispersión mediante transformaciones de fase y tratamiento térmico

¿Se ha preguntado alguna vez?

- ¿Quién inventó y voló en el primer avión controlable?
- ¿En qué forma los ingenieros refuerzan aleaciones de aluminio que se usan en aviones?
- ¿Si las aleaciones recuerdan su forma?
- ¿Por qué algunos aceros se endurecen en gran medida al templarlos cuando están a alta temperatura?
- ¿Qué aleaciones se usan para hacer frenos de ortodoncia?
- ¿Si sería posible aumentar aún más la solidez y la resistencia contra abolladuras de láminas de acero después de fabricado el chasis de un automóvil?
- ¿Qué son los materiales inteligentes?

En el capítulo 11 se examinó en detalle la forma en que las partículas de segunda fase pueden aumentar la resistencia de los materiales metálicos. También se vio cómo se preparan los materiales endurecidos por dispersión y qué vías son posibles para la formación de segundas fases durante la solidificación de aleaciones, en especial aleaciones eutécticas. En este capítulo, se examina con más profundidad el endurecimiento por dispersión al describir una amplia variedad de procesos de transformación de estado sólido, incluidos el endurecimiento por precipitación o envejecimiento y la reacción eutectoide. También se examina la forma en que las transformaciones de fase sin equilibrio, en particular la reacción martensítica, pueden ser mecanismos para el endurecimiento.

Cuando estudie estos mecanismos de endurecimiento, recuerde las características que producen el endurecimiento por dispersión más deseable, como se vio en el capítulo 11:

- La matriz debe ser relativamente blanda y dúctil y el precipitado, o segunda fase, debe ser fuerte;
- el precipitado debe ser redondo y discontinuo;
- las partículas de segunda fase deben ser pequeñas y numerosas, y
- en general, cuanto más precipitado haya, más fuerte será la aleación.

Al igual que en el capítulo 11, el énfasis será en el modo en que estas reacciones influyen en la resistencia de los materiales y en la forma en que los tratamientos térmicos pueden influir en otras propiedades. Se inicia con la formación de núcleos y crecimiento de partículas de segunda fase en transformaciones de fase de estado sólido.

12-1 Formación de núcleos y crecimiento en reacciones en estado sólido

En el capítulo 9 se analizó la formación de núcleos de un sólido a partir de una fusión. También se estudiaron los conceptos de supersaturación, subenfriamiento y nucleación homogénea y heterogénea. A continuación se verá la forma en que estos conceptos se aplican a transformaciones de fase de estado sólido tales como la reacción eutectoide. Para que un precipitado de fase β se forme a partir de una matriz sólida de fase α , deben ocurrir tanto la formación de núcleos como el crecimiento. El cambio total en energía libre necesario para la formación de núcleos de un precipitado esférico sólido de radio r de esta matriz es

$$\Delta G = \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_{v(\alpha \rightarrow \beta)} + 4 \pi r^2 \sigma_{\alpha\beta} + \frac{4}{3} \pi r^3 \varepsilon \quad (12-1)$$

Los primeros dos términos incluyen el cambio de energía libre por unidad de volumen (ΔG_v) y el cambio de energía necesario para crear el área unitaria de la interfaz $\alpha - \beta$ ($\sigma_{\alpha\beta}$), igual que en una solidificación (ecuación 9-1). El tercer término toma en cuenta la **energía de deformación** por unidad de volumen (ε), la energía indispensable para que un precipitado se ajuste en la matriz circundante durante la formación de núcleos y crecimiento del precipitado. El precipitado no ocupa el mismo volumen que se desplaza, de modo que se requiere de energía adicional para acomodar el precipitado en la matriz.

Formación de núcleos Al igual que en la solidificación, la formación de núcleos ocurre con más facilidad en superficies ya presentes en la estructura, con lo cual se reduce al mínimo el término de energía superficial. De este modo, los precipitados formados heterogéneamente se forman de una manera más fácil en límites de granos y otros defectos.

Crecimiento El crecimiento de precipitados normalmente se presenta por difusión del largo alcance y redistribución de átomos. Los átomos en difusión deben desprenderse de sus lugares originales (quizá en puntos de red en una solución sólida), moverse por el material circundante a los núcleos e incorporarse en la estructura cristalina del precipitado. En algunos casos, los átomos en difusión podrían estar tan apretadamente unidos dentro de una fase existente que el proceso de desprendimiento limita la rapidez de crecimiento. En otros casos, unir los átomos en difusión al precipitado, quizá por la deformación de red, limita el crecimiento. Este resultado a veces lleva a la formación de precipitados que tienen una relación especial con la estructura de la matriz que minimiza la deformación. Casi siempre, sin embargo, el factor de control es el paso de difusión.

Cinética La rapidez total, o *cinética*, del proceso de transformación depende de la formación de núcleos y del crecimiento. Si están presentes más núcleos a una temperatura particular, el crecimiento se presenta desde un gran número de lugares y la transformación de fase se completa en un periodo más corto. A temperaturas más elevadas, el coeficiente de difusión es más alto, las rapidezces de crecimiento son mayores y de nuevo se espera que la transformación se complete en un tiempo más corto, suponiendo un número igual de núcleos.

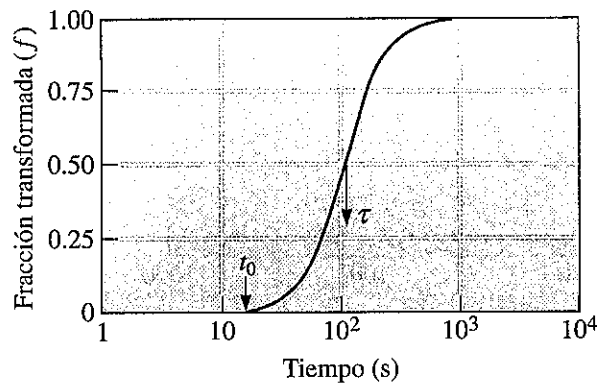


Figura 12-1

Curva sigmoide que muestra la rapidez de transformación de hierro CCCa a una temperatura constante. También se muestran el tiempo de incubación t_0 y el tiempo τ para la transformación al 50%.

La rapidez de transformación está dada por la ecuación de Avrami (ecuación 12-2), con la fracción transformada, f , relacionada con el tiempo, t , por

$$f = 1 - \exp(-ct^n) \quad (12-2)$$

donde c y n son constantes para una temperatura particular. Esta **relación de Avrami**, que se muestra en la figura 12-1, produce una curva sigmoide en forma de S. Esta ecuación puede describir casi todas las transformaciones de fase de estado sólido. Un tiempo de incubación, t_0 , durante el cual no ocurre una transformación observable, es el tiempo necesario para la formación de núcleos. Inicialmente, la transformación ocurre con lentitud a medida que se forman núcleos.

La incubación es seguida por un rápido crecimiento cuando los átomos se difunden al precipitado en crecimiento. Cerca del final de la transformación, la rapidez de nuevo se hace lenta cuando se agota la fuente de átomos disponibles para difundirse al precipitado de crecimiento. La transformación está 50% completa en el tiempo τ . Es frecuente que la rapidez de transformación esté dada por el recíproco de τ :

$$\text{Rapidez} = 1/\tau \quad (12-3)$$

Efecto de la temperatura En numerosas transformaciones de fase, el material se subenfria abajo de la temperatura a la que ocurre la transformación de fase bajo condiciones de equilibrio. Como la formación de núcleos y el crecimiento dependen de la temperatura, la rapidez de transformación de fase depende del subenfriamiento (ΔT). La rapidez de formación de núcleos es baja para subenfriamientos de pequeña magnitud (dado que la fuerza termodinámica motriz es baja), y aumenta para subenfriamientos más grandes cuando se incrementa la fuerza termodinámica motriz al menos hasta cierto punto (porque la difusión se hace más lenta a medida que disminuye la temperatura). Al mismo tiempo, la rapidez de crecimiento de la nueva fase disminuye en forma continua (por una difusión más lenta), cuando aumenta el subenfriamiento. La rapidez de crecimiento sigue una *relación de Arrhenius* (recuerde, ecuación 5-1):

$$\text{Rapidez de crecimiento} = A \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right), \quad (12-4)$$

donde Q es la energía de activación (en este caso, para la transformación de fase), R es la constante de los gases, T es la temperatura y A es una constante.

La figura 12-2 muestra curvas sigmoides a diferentes temperaturas para la recristalización de cobre; cuando se incrementa la temperatura, la rapidez de recristalización del cobre *aumenta*.

A cualquier temperatura particular, la rapidez total de transformación es el producto de las rapidez de formación de núcleos y de crecimiento. En la figura 12-3a), se ilustra el efecto combinado de las rapidez de formación de núcleos y crecimiento. Puede observarse una rapidez máxima de transformación a un subenfriamiento crítico. El tiempo necesario

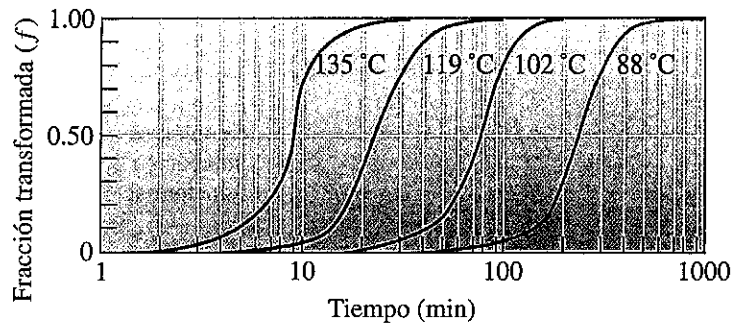


Figura 12-2 Efecto de la temperatura en la recrystalización de cobre trabajado en frío.

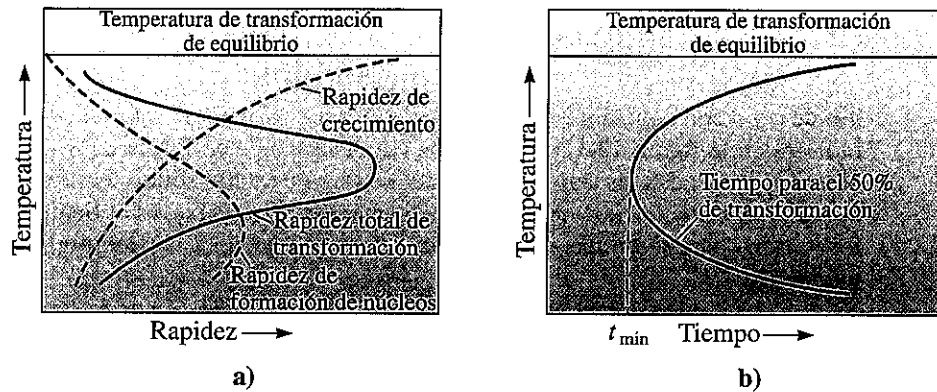


Figura 12-3 a) El efecto de la temperatura en la rapidez de transformación de fase es el resultado de las aportaciones de la rapidez de crecimiento y de la rapidez de formación de núcleos, que tiene como resultado una rapidez máxima de transformación a una temperatura crítica. b) En consecuencia, hay un tiempo mínimo ($t_{\min}$) necesario para la transformación, dado por la "curva C".

para la transformación está relacionado inversamente con la rapidez de transformación; la figura 12-3b) describe el tiempo (en una escala logarítmica) indispensable para la transformación. Esta curva en forma de C es común para numerosas transformaciones en metales, cerámicas, vidrios y polímeros. Nótese que el tiempo preciso a una temperatura correspondiente para la transformación de fase de equilibrio sería ∞ (es decir, la transformación de fase no ocurrirá). Esto se debe a que no hay subenfriamiento y, por tanto, la rapidez de nucleación homogénea es cero.

En algunos procesos, tal como en la recrystalización de un metal trabajado en frío, se encuentra que la rapidez de transformación disminuye en forma continua con la disminución de la temperatura. En este caso, con facilidad ocurre una formación de núcleos y predomina la difusión o crecimiento (es decir, el crecimiento es el paso limitante de la rapidez para la transformación). El siguiente ejemplo ilustra la forma en que la energía de activación para una transformación de fase de estado sólido, como una recrystalización, puede obtenerse a partir de datos relacionados con la cinética del proceso.

Ejemplo 12-1

Determine la energía de activación para la recrystalización de cobre a partir de las curvas sigmoideas de la figura 12-2.

SOLUCIÓN

La rapidez de transformación es el recíproco del tiempo τ necesario para que ocurra la mitad de la transformación. De la figura 12-2, se pueden calcular los tiempos requeridos para la transformación del 50% a diferentes temperaturas:

$T(^{\circ}\text{C})$	$T(\text{K})$	$\tau (\text{min})$	Rapidez (min^{-1})
135	408	9	0.111
119	392	22	0.045
102	375	80	0.0125
88	361	250	0.0040

La rapidez de transformación es una ecuación de Arrhenius, de modo que una gráfica de $\ln(\text{rapidez})$ contra $1/T$ (figura 12-4 y ecuación 12-4) permite calcular las constantes de la ecuación. Obteniendo el log natural en ambos lados de la ecuación 12-4:

$$\ln(\text{Rapidez de crecimiento}) = \ln A - \frac{Q}{RT}$$

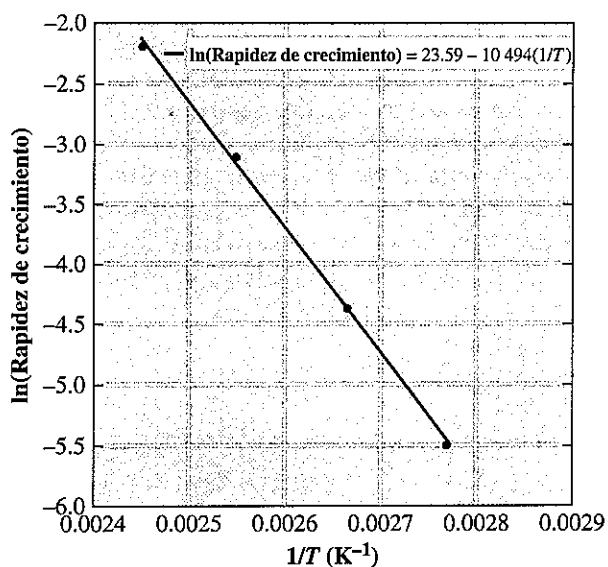


Figura 12-4
Gráfica de Arrhenius contra recíproco de la temperatura para recristalización de cobre (para el ejemplo 12-1).

Así, si se grafica $\ln(\text{Rapidez de crecimiento})$ como una función de $1/T$, se espera obtener una recta con pendiente de $-Q/R$. Una regresión lineal de los datos se muestra en la figura 12-4, que indica que la pendiente $-Q/R = -10494 \text{ K}$. Por tanto,

$$Q = 10494 \text{ K} \times 1.987 \text{ cal}/(\text{mol} \cdot \text{K}) = 20852 \text{ cal/mol}$$

y la constante A se calcula como

$$\ln A = 23.59$$

$$A = \exp(23.59) = 1.76 \times 10^{10} \text{ min}^{-1}$$

En este ejemplo particular, la rapidez a la que la reacción ocurre *aumenta* cuando *se incrementa* la temperatura, lo cual indica que la reacción puede estar dominada por difusión.

12-2 Aleaciones endurecidas al exceder el límite de solubilidad

En el capítulo 11 aprendió que las aleaciones de plomo y estaño (Pb-Sn) que contienen de 2 a 19% de Sn pueden ser endurecidas por dispersión porque se rebasa la solubilidad del estaño en plomo.

Algo semejante ocurre en aleaciones de aluminio y cobre. Por ejemplo, la aleación de Al-4% Cu (mostrada en la figura 12-5) es 100% α arriba de 500 °C. La fase α es una solución sólida de aluminio que contiene cobre hasta 5.65% en peso. Al enfriarse debajo de la temperatura de solvus, se precipita una segunda fase, θ . La fase θ , que es el compuesto intermetálico CuAl_2 duro y quebradizo, proporciona endurecimiento por dispersión. Al aplicar la regla de la palanca al diagrama de fases que se ve en la figura 12-5, se puede demostrar que a 200 °C y más abajo, en una aleación al 4% de cobre, sólo alrededor de 7.5% de la estructura final es θ . Se debe controlar la precipitación de la segunda fase para satisfacer los requisitos de un buen endurecimiento por dispersión.

Estructura Widmanstätten La segunda fase puede crecer de modo que ciertos planos y direcciones del precipitado sean paralelos a planos y direcciones preferidos en la matriz, creando un patrón de tejido de canasta conocido como **estructura Widmanstätten**. Este mecanismo de crecimiento reduce al mínimo las energías de deformación y superficiales y permite rapidez de crecimiento más velozes. El crecimiento Widmanstätten produce un aspecto característico en el precipitado. Cuando se produce una forma parecida a agujas [figura 12-6a)], el precipitado Widmanstätten puede estimular la nucleación de grietas, reduciendo así la ductilidad del material. Por el contrario, algunas de estas estructuras hacen más difícil que se propaguen las grietas, una vez formadas, con lo cual dan una buena tenacidad a la fractura. Ciertas aleaciones de titanio y cerámica obtienen tenacidad de esta forma.

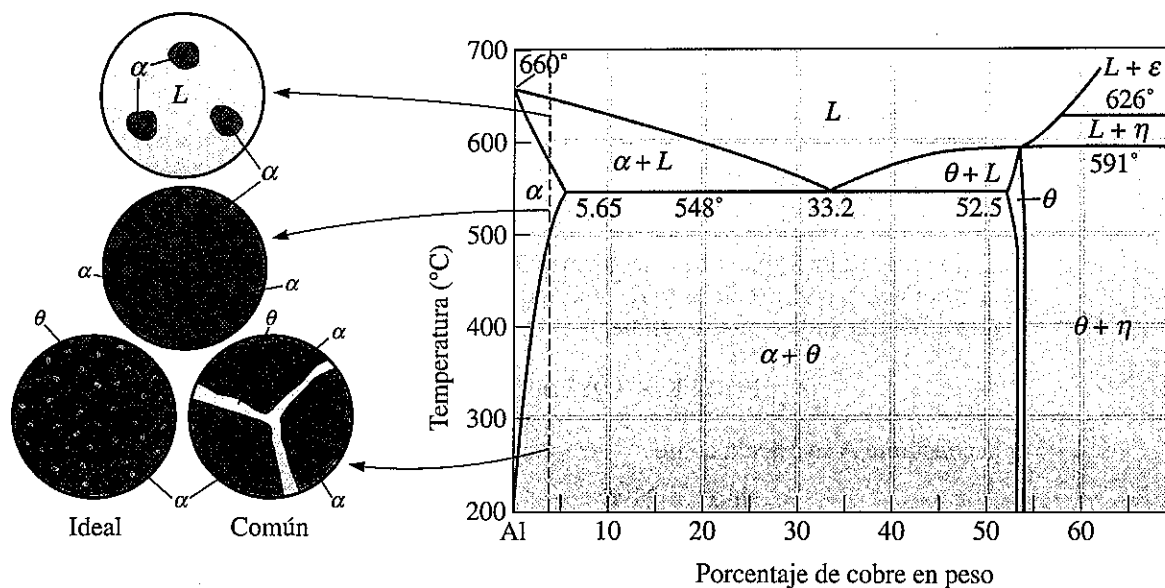


Figura 12-5 Diagrama de fases de aluminio-cobre y microestructuras que pueden desarrollarse durante el enfriamiento de una aleación de Al-4% Cu.

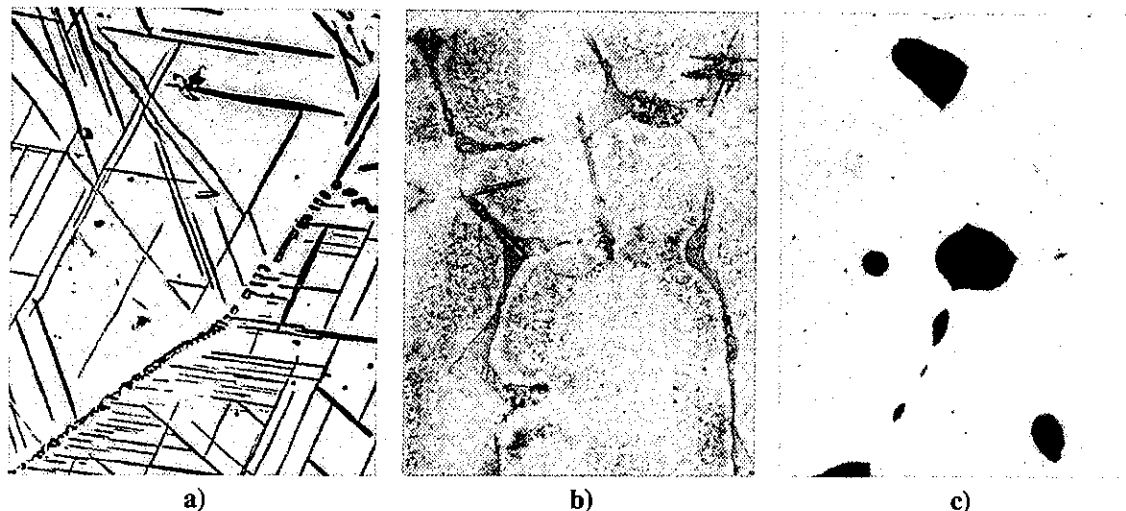


Figura 12-6 a) Aguas Widmanstätten en una aleación de Cu-Ti (420×). (Del ASM Handbook, vol. 9, *Metallography and Microstructure* (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.)
 b) Precipitado continuo θ en una aleación Al-4% Cu, causada por enfriamiento lento (500×).
 c) Precipitados de plomo en límites de grano en cobre (×500). (Micrografías b) y c) reimpresas por cortesía de Don Askeland.)

Relaciones de energía interfacial Se espera que el precipitado tenga una forma esférica para reducir al mínimo la energía superficial; no obstante, cuando el precipitado se forma en una interfaz, la forma del precipitado también está influida por la **energía interfacial** del límite entre los granos de la matriz y el precipitado. Suponiendo que en la segunda fase se formen núcleos en los límites del grano, las energías superficiales interfaciales del límite matriz-precipitado (γ_{mp}) y la energía de límite del grano de la matriz ($\gamma_{m,gb}$) fijan un **ángulo diedro** θ entre la interfaz matriz-precipitado que, a su vez, determina la forma del precipitado (figura 12-7). La relación es

$$\gamma_{m,gb} = 2\gamma_{mp} \cos \frac{\theta}{2}$$

Nótese que esta ecuación no se puede usar cuando el ángulo diedro es de 0° o 180° .

Si la fase del precipitado humedece completamente al grano (de manera semejante a la forma en que el agua humedece al vidrio), entonces el ángulo diedro es cero, y la segunda fase crece como una capa continua a lo largo de los límites del grano de la fase matriz. Si el ángulo diedro es pequeño, el precipitado puede ser continuo. Si el precipitado también es duro y quebradizo, la película delgada que rodea los granos de la matriz hace que la aleación sea muy quebradiza [figura 12-6b)].

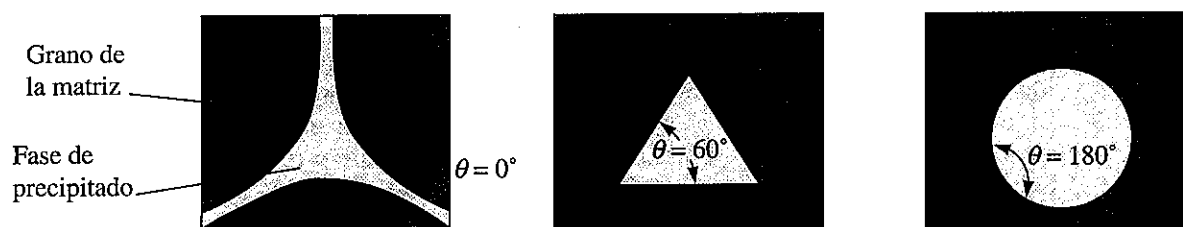


Figura 12-7 Efecto de la energía superficial y del ángulo diedro en la forma de un precipitado.

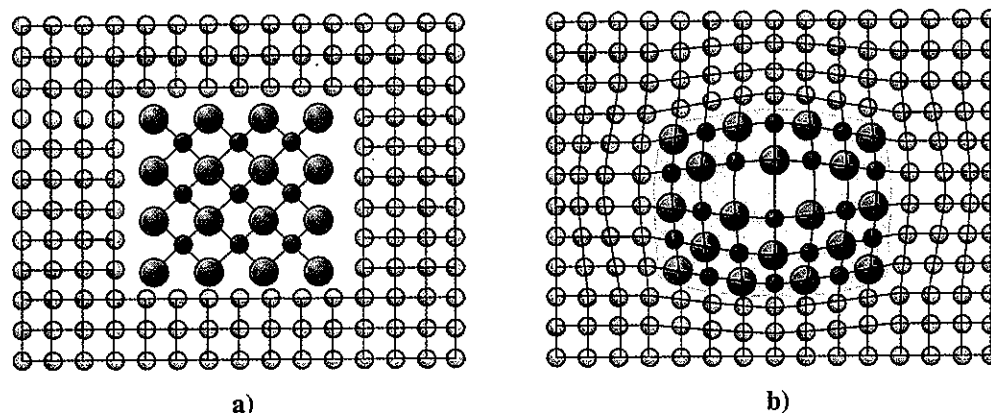


Figura 12-8 a) Un precipitado no coherente no tiene relación con la estructura cristalina de la matriz circundante. b) Se forma un precipitado coherente de modo que hay una relación definida entre las estructuras cristalinas del precipitado y de la matriz.

Por otra parte, se forman precipitados discontinuos e incluso esféricos cuando el ángulo diedro es grande [figura 12-6c]]. Esto ocurre si la fase del precipitado no humedece a la matriz.

Precipitado coherente Incluso si se produce una distribución uniforme de precipitados, el precipitado puede no alterar de manera importante la estructura de la matriz circundante [figura 12-8a)]. En consecuencia, el precipitado bloquea el deslizamiento sólo si se encuentra directamente en la trayectoria de la dislocación.

Cuando se forma un **precipitado coherente**, los planos de átomos de la estructura cristalina del precipitado están relacionados con los planos de la estructura cristalina de la matriz, o incluso son continuos con estos planos [figura 12-8b)]. Ahora se crea una disrupción extendida de la estructura cristalina de la matriz, y el movimiento de una dislocación se impide aun en el caso de que la dislocación simplemente pase cerca del precipitado coherente. Un tratamiento térmico especial, por ejemplo el endurecimiento por envejecimiento, puede producir el precipitado coherente.

12-3 Endurecimiento por envejecimiento o por precipitación

El **endurecimiento por envejecimiento**, o **endurecimiento por precipitación**, se produce por una secuencia de transformaciones de fase que lleva a una dispersión uniforme de precipitados coherentes a nanoescala en una matriz más dúctil y más blanda. El suceso inadvertido de este proceso puede haber ayudado a los hermanos Wright, quienes, el 17 de diciembre de 1903, hicieron el primer vuelo manejable que cambió al mundo para siempre (véase la imagen inicial del capítulo). Gayle y sus colegas demostraron que la aleación de aluminio, empleada por los hermanos Wright para hacer el motor del avión que voló por primera vez, adquirió cobre del molde de vaciado. El endurecimiento por envejecimiento ocurrió de manera inadvertida cuando el molde permaneció caliente durante el proceso de vaciado. La aplicación del endurecimiento por envejecimiento empezó con el histórico vuelo de los hermanos Wright y, hasta la fecha, las aleaciones de aluminio empleadas para aviones se endurecen usando esta técnica. El endurecimiento por envejecimiento o por precipitación es probablemente uno de los primeros ejemplos de materiales de nanoestructura que han hallado aplicaciones generalizadas.

12-4 Aplicaciones de aleaciones endurecidas por envejecimiento

Antes de examinar los detalles de los mecanismos de transformaciones de fase que son necesarias para que ocurra el endurecimiento por envejecimiento, hay que analizar algunas de las aplicaciones de esta técnica. Una ventaja importante del endurecimiento por envejecimiento es que puede usarse para aumentar la resistencia a la fluencia (límite elástico) de numerosos materiales metálicos, por medio de tratamientos térmicos relativamente sencillos y sin crear cambios importantes en la densidad. De este modo, la relación entre resistencia y densidad de una aleación se puede mejorar considerablemente usando el endurecimiento por envejecimiento. Por ejemplo, la resistencia a la fluencia de una aleación de aluminio puede aumentarse de unas 20 000 libras por pulgada cuadrada (psi) a 60 000 psi como resultado del endurecimiento por envejecimiento.

Las superaleaciones basadas en níquel (aleaciones basadas en Ni, Cr, Al, Ti, Mo y C) son precipitaciones endurecidas por precipitación de una fase γ' semejante al Ni_3Al que es rica en Al y Ti. Del mismo modo, las aleaciones de titanio (por ejemplo Ti-6% Al-4% V), aceros inoxidables, Cu-Al y otros aceros son endurecidas por precipitación y empleadas para una amplia variedad de aplicaciones.

Nuevas fórmulas de lámina de acero están diseñadas de modo que el endurecimiento por precipitación ocurra en los materiales cuando la pintura en el chasis está siendo "hornada" o curada ($\sim 100^\circ\text{C}$). Estos aceros que se pueden endurecer al horno son sólo un ejemplo de aceros que aprovechan el efecto reforzador proporcionado por mecanismos de endurecimiento por envejecimiento.

Una debilidad asociada con este mecanismo es que las aleaciones endurecidas por envejecimiento pueden emplearse en una escala limitada de temperaturas. A temperaturas más altas, los precipitados formados inicialmente empiezan a crecer, y en última instancia se disuelven, si las temperaturas son lo suficientemente altas (sección 12-8). Aquí es donde las aleaciones, en las que se logra endurecimiento por dispersión con el uso de una segunda fase insoluble, son más efectivas que las aleaciones endurecidas por envejecimiento.

12-5 Evolución microestructural en endurecimiento por envejecimiento o por precipitación

¿Cómo se forman precipitados en el endurecimiento por precipitación? ¿Cómo crecen o envejecen? ¿Los precipitados pueden crecer demasiado, o envejecer en exceso, de modo que no puedan dar un máximo endurecimiento por dispersión? Las respuestas a estas preguntas se pueden hallar si se sigue la evolución microestructural, en la secuencia de transformaciones de fase que son necesarias para el endurecimiento por envejecimiento.

Se usa el Al-Cu como sistema arquetípico para ilustrar estas ideas. La aleación Al-4% Cu es un ejemplo clásico de una aleación que puede endurecerse por envejecimiento. Hay tres pasos en el tratamiento térmico de endurecimiento por envejecimiento (figura 12-9).

Paso 1: tratamiento por solución En el tratamiento por solución, la aleación se calienta primero arriba de la temperatura de solvus y se mantiene así hasta que se produce una solución α sólida homogénea. Este paso disuelve el precipitado de fase β y reduce cualquier segregación microquímica presente en la aleación original.

Se podría calentar la aleación a una temperatura justo debajo de la temperatura de solidus y aumentar la rapidez de homogenización, pero, la presencia de un microconstituyente eutéctico sin equilibrio puede causar fusión (fragilidad en caliente, capítulo 10). Así, la aleación Al-4% Cu es tratada por solución entre 500 y 548 $^\circ\text{C}$, esto es, entre las temperaturas de solvus y eutéctica.

Paso 2: templado Después del tratamiento por solución, la aleación, que contiene sólo α en su estructura, se enfría rápidamente, es decir, se temple. Los átomos no tienen

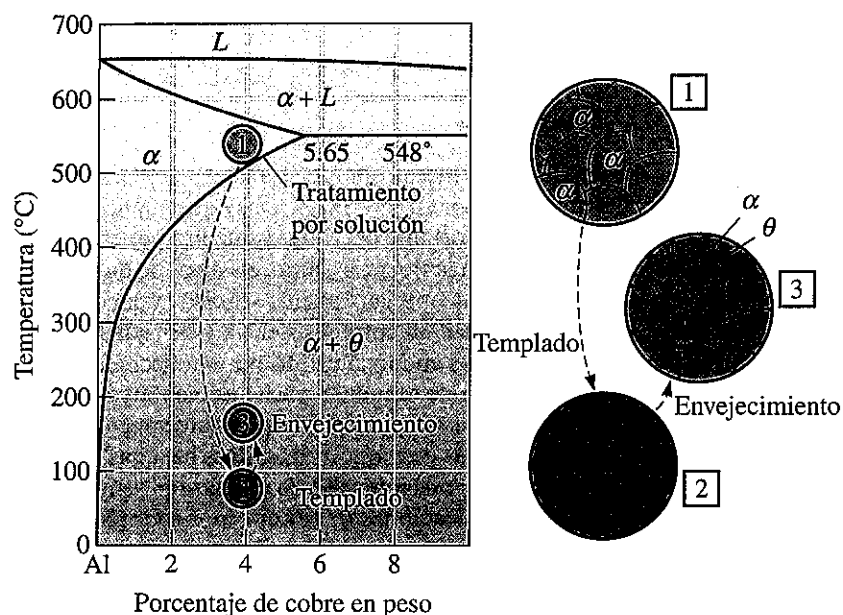


Figura 12-9 Diagrama de un extremo rico en aluminio de la fase aluminio-cobre, que muestra los tres pasos del tratamiento térmico de endurecimiento por envejecimiento y las microestructuras que se producen.

tiempo de difundirse a potenciales sitios de formación de núcleos, de modo que θ no se forma. Después del temple, la estructura es una **solución sólida sobresaturada** α_{ss} que contiene exceso de cobre, y no es una estructura en equilibrio. Es una estructura metaestable. Esta situación es efectivamente la misma que el subenfriamiento de agua, metales fundidos y vidrios de silicato (capítulo 9). La única diferencia es que se está tratando con materiales en su estado sólido.

Paso 3: envejecimiento Finalmente, la α sobresaturada se calienta a una temperatura debajo de la temperatura de solvus. A esta temperatura de *envejecimiento*, los átomos se difunden sólo cortas distancias. Como la α sobresaturada es metaestable, los átomos adicionales de cobre se difunden a numerosos sitios de formación de núcleos y los precipitados crecen. Al final, si se mantiene la aleación durante tiempo suficiente a la temperatura de envejecimiento, se produce la estructura de equilibrio $\alpha + \theta$. Nótese que aun cuando la estructura que se forma tiene dos fases de equilibrio (es decir, $\alpha + \theta$), la morfología de las fases es diferente de la estructura que se hubiera obtenido por el lento enfriamiento de esta aleación (figura 12-5). Cuando se pasa por las tres etapas descritas previamente, se produce la fase θ en forma de partículas de precipitado de segunda fase dispersas de manera uniforme y ultrafina. Esto es lo que se necesita para un efectivo endurecimiento por precipitación.

Los siguientes dos ejemplos ilustran el efecto de temple en la composición de fases y un diseño para un tratamiento de endurecimiento por envejecimiento.

Ejemplo 12-2

Compare la composición de la solución sólida α en la aleación Al-4% Cu a temperatura ambiente, cuando la aleación se enfría bajo condiciones de equilibrio, con la composición cuando se temple la aleación.

SOLUCIÓN

En la figura 12-9 se puede trazar una línea de conexión a temperatura ambiente. La composición de α determinada a partir de la línea de conexión es alrededor de 0.02% de Cu; no obstante, la composición de α después del templado es todavía 4% de Cu. Como α contiene más que el contenido de cobre de equilibrio, la α está sobresaturada con cobre.

Ejemplo 12-3

Diseño de un tratamiento térmico de endurecimiento por envejecimiento

En la figura 12-10 se ilustra una parte del diagrama de fases magnesio-aluminio. Suponga que una aleación Mg-8% Al es responsable de un tratamiento térmico de endurecimiento por envejecimiento. Diseñe un tratamiento térmico para la aleación.

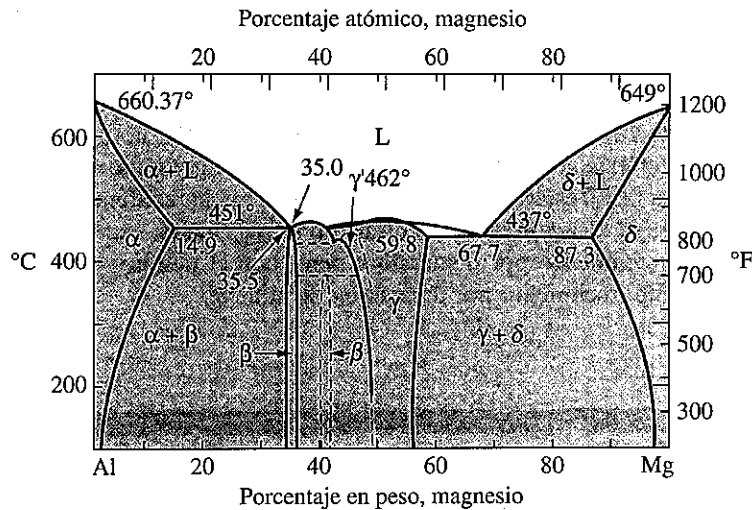


Figura 12-10 Diagrama de fases de aluminio-magnesio.

SOLUCIÓN

- Paso 1: Haga un tratamiento por solución a una temperatura entre solvus y eutéctica para evitar fragilidad en caliente. Así, caliente entre 340 y 451 °C.
- Paso 2: Temple a temperatura ambiente lo suficientemente rápido para evitar que se forme el precipitado fase β .
- Paso 3: Envejezca a una temperatura abajo de solvus, esto es, debajo de 340 °C, para formar una dispersión fina de la fase β .

Precipitados sin equilibrio durante el envejecimiento

Durante el envejecimiento de aleaciones de aluminio-cobre, se forma una serie continua de otras fases de precipitados precursores antes de la formación de la fase θ de equilibrio. Esto es muy común en aleaciones endurecidas por precipitación. El diagrama simplificado de la figura 12-9 no muestra estas fases intermedias. Al principio del envejecimiento, los átomos de cobre se concentran en planos $\{100\}$ en la matriz α y producen precipitados muy delgados llamados zonas de Guinier-Preston (GP). A medida que continúa el envejecimiento, más átomos de cobre

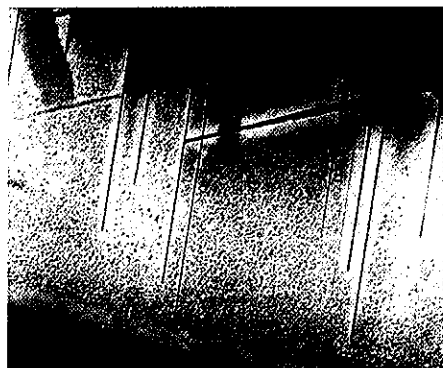


Figura 12-11

Micrografía electrónica de envejecimiento de Al-15% Ag que muestra placas coherentes γ' y zonas GP redondas (40 000 $\times$). (Cortesía de J. B. Clark.)

se difunden en el precipitado y las zonas GP-I se engruesan formando discos delgados, o zonas GP-II. Al seguir la difusión continua, los precipitados desarrollan un grado superior de orden y se denominan θ' . Al final, se produce el precipitado estable θ .

Los precipitados sin equilibrio, GP-I, GP-II y θ' , son coherentes. La resistencia de la aleación aumenta con el tiempo de envejecimiento cuando estas fases coherentes crecen de tamaño durante las etapas iniciales del tratamiento térmico. Cuando están presentes estos precipitados coherentes, la aleación está en condición envejecida. La figura 12-11 muestra la estructura de una aleación Al-Ag envejecida. Este importante desarrollo en la evolución de la microestructura de aleaciones endurecidas por precipitación es la razón por la cual el tiempo para el tratamiento térmico durante el envejecimiento es muy importante.

Cuando la fase θ estable no coherente se precipita, la resistencia de la aleación empieza a disminuir. Ahora la aleación está en condición envejecida en exceso. La θ todavía proporciona algún endurecimiento por dispersión, pero, con el tiempo, la θ crece más y hasta el simple efecto de endurecimiento por dispersión disminuye.

12-6

Efectos de la temperatura y del tiempo de envejecimiento

Las propiedades de una aleación que puede endurecerse por envejecimiento dependen de la temperatura de envejecimiento y del tiempo de envejecimiento (figura 12-12). A 260 °C, la difusión en la aleación Al-4% Cu es veloz y se forman precipitados rápidamente. La resistencia alcanza un máximo después de una exposición de menos de 0.1 h. Ocurre exceso de envejecimiento si la aleación se mantiene durante más de 0.1 h (6 minutos).

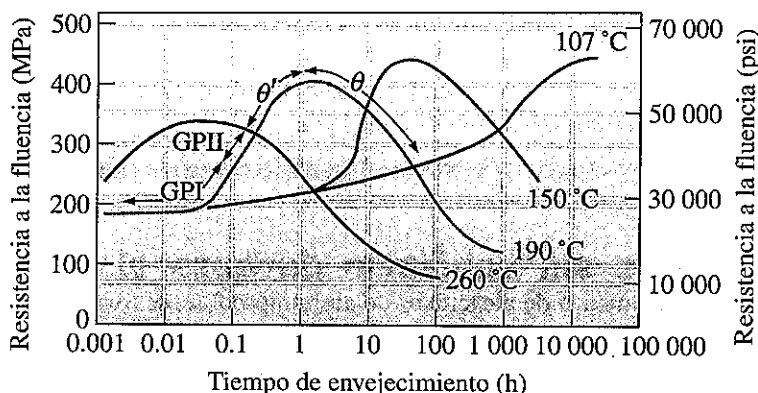


Figura 12-12 Efecto de la temperatura y del tiempo de envejecimiento en la resistencia a la fluencia de una aleación Al-4% Cu.

A 190 °C, que es una temperatura común de envejecimiento para numerosas aleaciones de aluminio, se requiere de un tiempo más largo para producir la resistencia óptima pero hay beneficios por el uso de una temperatura más baja. Primero, la resistencia máxima aumenta cuando disminuye la temperatura de envejecimiento. En segundo término, la aleación mantiene su máxima resistencia un tiempo más largo. En tercero, las propiedades son más uniformes. Si la aleación es envejecida durante sólo 10 minutos a 260 °C, la superficie de la pieza alcanza la temperatura apropiada y se refuerza, pero el centro permanece frío y envejece sólo ligeramente. El ejemplo que sigue ilustra el efecto del tiempo del tratamiento térmico por envejecimiento en la resistencia de aleaciones de aluminio.

Ejemplo 12-4

Efecto del tiempo del tratamiento térmico por envejecimiento en la resistencia de aleaciones de aluminio

El operador de un horno salió una hora a tomar sus alimentos, sin remover la aleación de Al-4% Cu del horno empleado para el tratamiento por envejecimiento. Compare el efecto en la resistencia a la fluencia de la hora adicional de envejecimiento para las temperaturas de envejecimiento de 190 y 260 °C.

SOLUCIÓN

A 190 °C, la resistencia máxima de 400 MPa (60 000 psi) ocurre en 2 horas (figura 12-12). Después de 3 h, la resistencia es en esencia la misma.

A 260 °C, la resistencia máxima de 340 MPa (50 000 psi) ocurre en 0.06 h; no obstante, después de 1 h, la resistencia disminuye a 250 MPa (35 000 psi).

Entonces, la temperatura de envejecimiento más alta da una menor resistencia máxima y hace que la resistencia sea más sensible al tiempo de envejecimiento.

El envejecimiento ya sea a 190 o a 260 °C se denomina **envejecimiento artificial** porque la aleación se calienta para producir la precipitación. Algunas aleaciones tratadas por solución y templadas envejecen a temperatura ambiente; esto se llama **envejecimiento natural**. El envejecimiento natural requiere de tiempos largos, a veces de varios días, para alcanzar una máxima resistencia; no obstante, la máxima resistencia es más alta que la obtenida por envejecimiento artificial y no ocurre exceso de envejecimiento.

Una observación interesante hecha por el doctor Gayle y sus colegas de trabajo en el NIST es un sorprendente ejemplo de la diferencia entre el envejecimiento natural y el artificial. El doctor Gayle y sus colegas analizaron la aleación de aluminio del motor empleado en el avión de los hermanos Wright y encontraron dos cosas interesantes. Primero, hallaron que la aleación original había sido sometida a endurecimiento por precipitación como resultado de haber permanecido en el molde por un periodo de tiempo y a una temperatura que fueron suficientes para causar endurecimiento por precipitación. En segundo lugar, como la aleación fue colada en 1903, hasta 1993 cuando se realizó la investigación (casi 90 años después) la aleación había continuado envejeciendo de manera natural. Esto podía verse por dos distribuciones de tamaño diferente en las partículas del precipitado usando microscopía de transmisión electrónica. En algunas aleaciones de aluminio (designadas como T4) empleadas para hacer postes o pasadores cónicos, puede ser necesario refrigerar la aleación antes de la formación para evitar el envejecimiento natural a temperatura ambiente. Si no se hace así, la aleación envejecería a temperatura ambiente, se haría más dura y no podría maquinarse.

12-7 Requisitos para el endurecimiento por envejecimiento

No todas las aleaciones se pueden endurecer por envejecimiento. Deben satisfacerse cuatro condiciones para que una aleación tenga una respuesta de endurecimiento por envejecimiento durante el tratamiento térmico:

1. El sistema de la aleación debe presentar una solubilidad sólida decreciente con una temperatura decreciente. En otras palabras, la aleación debe formar una sola fase al calentarse arriba de la línea de solvus y luego entrar a una región de dos fases al enfriarse.
2. La matriz debe ser relativamente blanda y dúctil, y el precipitado debe ser duro y quebradizo. En casi todas las aleaciones que se pueden endurecer por envejecimiento, el precipitado es un compuesto intermetálico quebradizo y duro.
3. La aleación debe poder templarse. Algunas aleaciones no se pueden enfriar con suficiente rapidez para suprimir la formación del precipitado. El templado puede, sin embargo, introducir esfuerzos residuales que causan distorsión de la pieza (capítulo 8). Para reducir al mínimo los esfuerzos residuales, las aleaciones de aluminio se templean en agua caliente a unos 80 °C.
4. Debe formarse un precipitado coherente.

Como se mencionó en la sección 12-4, varias aleaciones importantes, incluyendo ciertos aceros inoxidables y aleaciones basadas en aluminio, magnesio, titanio, níquel, cromo, hierro y cobre satisfacen estas condiciones y pueden ser endurecidas por envejecimiento.

12-8 Uso de aleaciones que pueden endurecerse por envejecimiento a altas temperaturas

Con base en el análisis anterior, no se seleccionaría una aleación de Al-4% Cu endurecida por envejecimiento para emplearla a altas temperaturas. A temperaturas de servicio de 100 a 500 °C, la aleación se envejece de manera excesiva y pierde su resistencia. Arriba de 500 °C, la segunda fase vuelve a disolverse en la matriz y ni siquiera se obtiene endurecimiento por dispersión. En general, las aleaciones de aluminio que pueden endurecerse por envejecimiento están mejor adaptadas para servicio a temperaturas cercanas a la ambiente. No obstante, algunas aleaciones de magnesio pueden mantener su resistencia a unos 250 °C y ciertas superaleaciones de níquel resisten el exceso de envejecimiento a 1000 °C.

Es posible que también haya problemas al soldar aleaciones que pueden endurecerse por envejecimiento (figura 12-13). Durante la operación de soldadura, el metal adyacente a la soldadura se calienta. La *zona afectada por el calor* (ZAC) contiene dos zonas principales. La zona de temperatura más baja cerca del metal base no afectado está expuesta a temperaturas justo abajo de la de solvus y puede tener exceso de envejecimiento. La zona de temperatura más alta es tratada por solución, lo cual elimina los efectos del endurecimiento por envejecimiento. Si la zona tratada por solución se enfría con lentitud, puede formarse una θ estable en los límites de granos y hace quebradiza la zona soldada. Los procesos de soldadura muy rápidos, por ejemplo la soldadura por haz de electrones, completan el tratamiento de recalentado de la zona después de la soldadura, o la soldadura de la aleación en la condición tratada por solución, mejoran la calidad de la soldadura (capítulo 9). La soldadura de superaleaciones, con base de níquel reforzadas por endurecimiento por precipitación, no plantea esos problemas porque el proceso de precipitación es lento y el proceso de soldadura simplemente actúa como tratamiento por solución y templado. El proceso de soldadura por agitación y fricción también se ha aplicado recientemente a la soldadura de aleaciones de Al y Al-Li para aplicaciones aeroespaciales y de aviones.

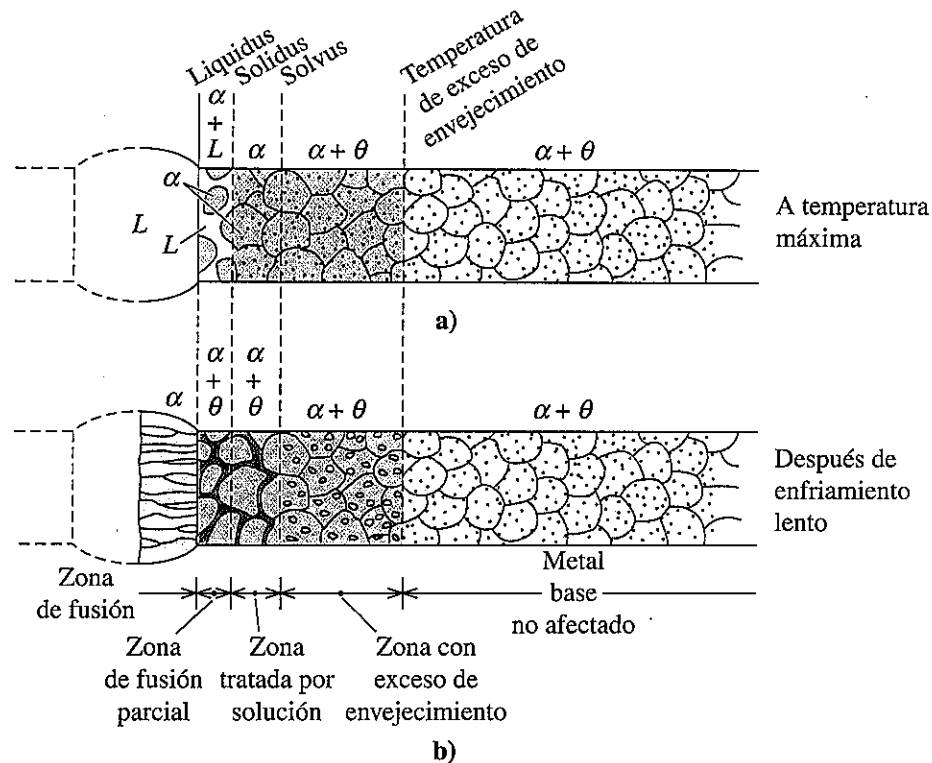


Figura 12-13 Cambios microestructurales que ocurren en aleaciones que pueden endurecerse por envejecimiento durante soldadura de fusión: a) microestructura en la soldadura a la temperatura máxima, y b) microestructura en la soldadura después de enfriamiento lento a temperatura ambiente.

12-9 La reacción eutectoide

En el capítulo 11 se definió el eutectoide como una reacción de estado sólido en la que una fase sólida se transforma en otras dos fases sólidas:



Como ejemplo de la forma en que se puede usar la reacción eutectoide para controlar la microestructura y propiedades de una aleación, se examina la parte tecnológicamente importante del diagrama de fases de hierro-carburo de hierro (Fe-Fe₃C) (figura 12-14), que es la base de los aceros y los hierros colados. La formación de las dos fases sólidas (α y Fe₃C) permite obtener endurecimiento por dispersión. La capacidad de controlar la presencia de la reacción eutectoide, que incluye el hacer que ocurra, hacerla lenta o evitarla por completo, es probablemente el paso más importante en el procesamiento termomecánico de los aceros. En el diagrama de Fe-Fe₃C, la temperatura eutectoide se conoce como temperatura A_1 . El límite entre austenita (γ) y el campo de dos fases formado por ferrita (α) y austenita se conoce como A_3 . El límite entre austenita (γ) y el campo de dos fases formado por cementita (Fe₃C) y austenita se conoce como A_{cm} .

Normalmente no hay interés en el extremo rico en carbono del diagrama de fases de Fe-C, y esto es por lo que se examina el diagrama Fe-Fe₃C como parte del diagrama binario de fases de Fe-C.

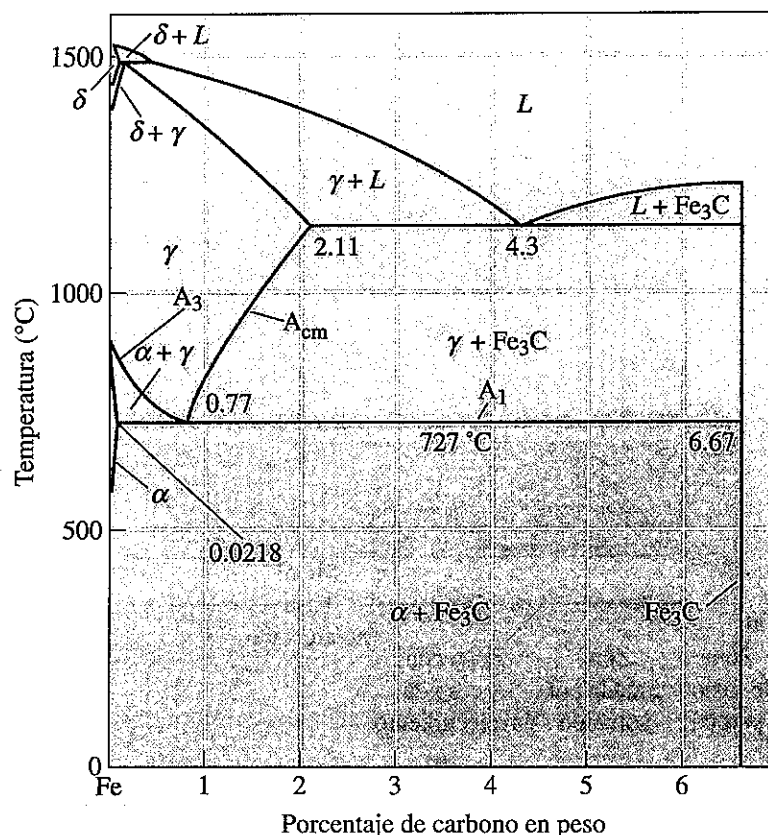


Figura 12-14 Diagrama de fases de Fe-Fe₃C (parte del diagrama Fe-C). La recta vertical en 6.67% C es el compuesto estequiométrico Fe₃C.

Soluciones sólidas El hierro pasa por dos transformaciones alotrópicas (capítulo 3) durante calentamiento o enfriamiento. Inmediatamente después de la solidificación, el hierro forma una estructura CCCu llamada ferrita- δ . Con más enfriamiento, el hierro se transforma en una estructura CCCa llamada γ , o **austenita**. Por último, el hierro se transforma de nuevo en la estructura CCCu a temperaturas más bajas; esta estructura recibe el nombre de α , o **ferrita**. Las dos ferritas (α y δ) y la austenita son soluciones sólidas de átomos intersticiales de carbono en hierro. Normalmente, cuando no se hace una referencia específica, el término de ferrita se refiere a la ferrita α , porque ésta es la fase que se encuentra con más frecuencia durante el tratamiento térmico de los aceros. Ciertos materiales de cerámica empleados en aplicaciones magnéticas también se conocen como ferritas (capítulo 20), pero no están relacionados con la fase de ferrita del sistema Fe-Fe₃C.

Debido a que los huecos intersticiales en la estructura cristalina CCCa son un poco más grandes que los huecos en la estructura cristalina CCCu, se puede acomodar un mayor número de átomos de carbono en el hierro CCCa. Así, la máxima solubilidad del carbono en austenita es de 2.11% C, mientras que la máxima solubilidad del carbono en hierro CCCu es mucho menor (es decir, $\sim 0.0218\%$ C en α y 0.09% C en δ). Las soluciones sólidas de carbono en hierro son relativamente blandas y dúctiles, pero son más fuertes que el hierro puro debido al endurecimiento por solución sólida por el carbono.

Compuestos Se forma un compuesto estequiométrico Fe₃C, o **cementita**, cuando se rebasa la solubilidad del carbono en hierro sólido. El Fe₃C contiene 6.67% C, es extremadamente duro y quebradizo (como un material de cerámica), y está presente en todos los aceros comerciales. Si se controla en forma apropiada la cantidad, tamaño y forma del Fe₃C, se controla el grado de endurecimiento por dispersión y las propiedades del acero.

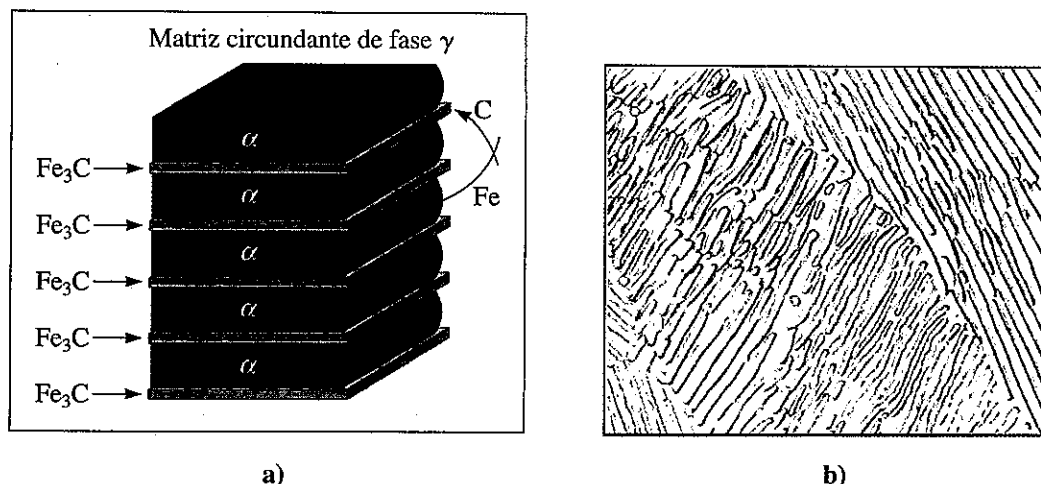


Figura 12-15 Crecimiento y estructura de la perlita: a) redistribución del carbono y del hierro, y b) micrografía de laminillas de perlita (2000×). (De ASM Handbook, vol. 7, *Metallography and Microstructure* (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.)

La reacción eutectoide Si se calienta una aleación que contenga la composición eutectoide de 0.77% C arriba de 727 °C, se produce una estructura que contiene sólo granos de austenita. Cuando la austenita se enfría a 727 °C, empieza la reacción eutectoide:



Al igual que en la reacción eutéctica, las dos fases que se forman tienen composiciones diferentes, de modo que deben difundirse átomos durante la reacción (figura 12-15). La mayor parte del carbono de la austenita se difunde al Fe_3C y casi todos los átomos de hierro se difunden a la α . Esta redistribución de átomos es más fácil si las distancias de difusión son cortas, que es el caso cuando la α y el Fe_3C crecen en forma de laminillas o placas delgadas.

Perlita La estructura laminar de α y Fe_3C que se desarrolla en el sistema hierro-carbono se denomina **perlita**, que es un microconstituyente en el acero. Ésta se llamó así porque la perlita pulida y atacada químicamente muestra el colorido de la madreperla. Las laminillas de la perlita son mucho más finas que las del eutéctico de plomo-estaño, porque los átomos de hierro y carbono deben difundirse a través de la austenita sólida en vez de por la líquida. Una forma de ver la perlita es considerarla como un nanocompuesto de metal-cerámica. El siguiente ejemplo muestra el cálculo de las cantidades de las fases en el microconstituyente perlita.

Ejemplo 12-5 *Cálculo de la cantidad de las fases en la perlita*

Calcule la cantidad de ferrita y cementita presentes en la perlita.

SOLUCIÓN

Como la perlita debe contener 0.77% C, usando la regla de la palanca:

$$\begin{aligned} \% \alpha &= \frac{6.67 - 0.77}{6.67 - 0.0218} \times 100 = 88.7\% \\ \% \text{Fe}_3\text{C} &= \frac{0.77 - 0.0218}{6.67 - 0.0218} \times 100 = 11.3\% \end{aligned}$$

Microconstituyentes primarios

En aleaciones hipereutectoides, la fase primaria es Fe_3C , que se forma en los límites de granos de austenita. Después que la austenita se enfría a través de la reacción eutectoide, el acero contiene cementita dura y quebradiza que rodean a las islas de perlita [figura 12-17b)]. Ahora, debido a que el microconstituyente duro y quebradizo es continuo, el acero también es quebradizo. Por fortuna, es posible mejorar la microestructura y propiedades de los aceros hipereutectoides mediante un tratamiento térmico. El siguiente ejemplo muestra el cálculo de las cantidades y composiciones de fases y microconstituyentes en un acero al carbono simple.

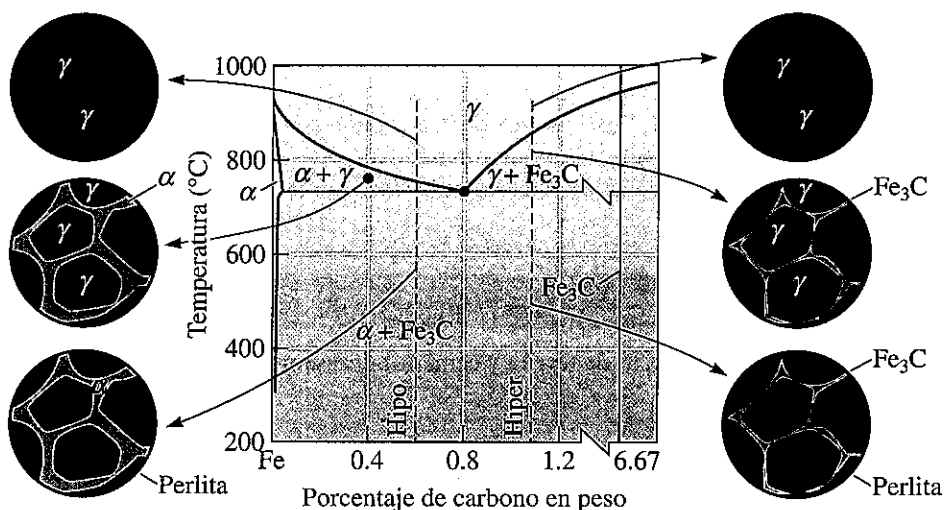


Figura 12-16 Evolución de la microestructura de los aceros hipoeutectoides e hipereutectoides durante el enfriamiento, en relación con el diagrama de fases de Fe-Fe₃C.

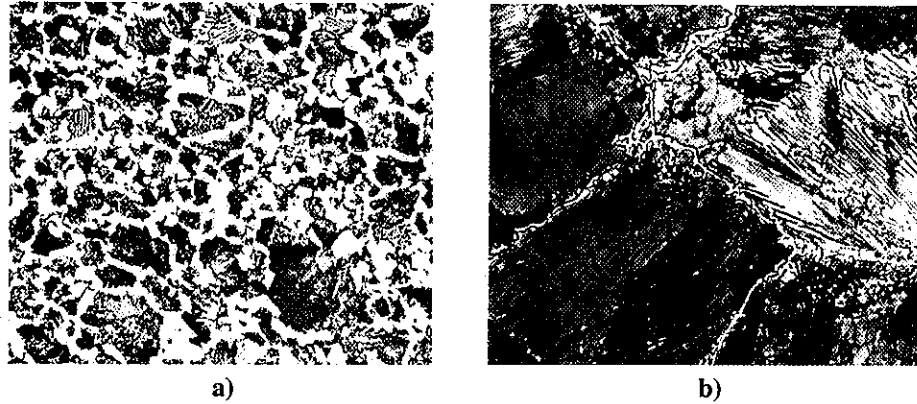


Figura 12-17 a) Acero hipoeutectoide que muestra alfa primaria (blanca) y perlita (400×). b) Acero hipereutectoide que muestra Fe_3C primaria rodeando a la perlita (800×). (De ASM Handbook, vol.7 (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.)

Ejemplo 12-6 *Reacción en acero hipoeutectoide al carbono simple*

Calcule las cantidades y composiciones de fases y microconstituyentes en una aleación Fe-0.60% C a 726 °C.

SOLUCIÓN

Las fases son ferrita y cementita. Usando una línea de conexión y aplicando la ley de la palanca a 726 °C, se encuentra

$$\alpha(0.0218\% \text{ C}) \quad \% \alpha = \left[\frac{6.67 - 0.60}{6.67 - 0.0218} \right] \times 100 = 91.3\%$$

$$\text{FeC}(6.67\% \text{ C}) \quad \% \text{Fe}_3\text{C} = \left[\frac{0.60 - 0.0218}{6.67 - 0.0218} \right] \times 100 = 8.7\%$$

Los microconstituyentes son ferrita y perlita primarias. Si se traza, una línea de conexión justo arriba de 727 °C, es posible calcular las cantidades de las composiciones de ferrita y austenita exactamente antes de que empiece la reacción eutectoide. Toda la austenita a esa temperatura tendrá la composición eutectoide (es decir, contendrá 0.77% C) y se transformará en perlita; toda la ferrita proeutectoide permanecerá como ferrita primaria.

$$\alpha \text{ primaria } (0.0218\% \text{ C}) \quad \% \alpha \text{ primaria} = \left[\frac{0.77 - 0.60}{0.77 - 0.0218} \right] \times 100 = 22.7\%$$

$$\text{Austenita justo arriba de } 727^\circ\text{C} = \text{Perlita} : 0.77\% \text{ C}$$

$$\% \text{ Perlita} = \left[\frac{0.60 - 0.0218}{0.77 - 0.0218} \right] \times 100 = 77.3\%$$

12-10 Control de la reacción eutectoide

Se controla el endurecimiento por dispersión en las aleaciones eutectoides en forma muy semejante a como se hizo en las aleaciones eutécticas (capítulo 11).

Control de la cantidad del eutectoide Al cambiar la composición de la aleación, se cambia la cantidad de la segunda fase dura. Cuando el contenido de carbono del acero aumenta hacia la composición eutectoide de 0.77% C, las cantidades de Fe_3C y perlita se incrementan, aumentando así la resistencia. Este efecto de endurecimiento llega por último a un máximo, y las propiedades se nivelan o incluso disminuyen cuando el contenido de carbono es demasiado alto (tabla 12-1).

Control del tamaño de grano de la austenita Es posible aumentar el número de colonias de perlita si se reduce el tamaño previo de granos de austenita, por lo general usando temperaturas bajas para producir la austenita. Normalmente, es posible aumentar la resistencia de la aleación al reducir el tamaño inicial de granos de austenita, con lo cual aumenta el número de colonias. La perlita crece como granos o colonias. Dentro de cada colonia, la orientación de las laminillas es idéntica. Las colonias nuclean más fácilmente en los límites de granos de los granos originales de austenita.

Control de la rapidez de enfriamiento Al aumentar la rapidez de enfriamiento durante la reacción eutectoide, se reduce la distancia a la cual los átomos pueden difundirse. En consecuencia, las laminillas producidas durante la reacción son más finas o están más cercanamente espaciadas. Al producir perlita fina, se aumenta la resistencia de la aleación (tabla 12-1 y figura 12-18).

Control de la temperatura de transformación La reacción eutectoide de estado sólido es más bien lenta, y el acero puede enfriarse por abajo de la temperatura eutectoide de equilibrio antes de que empiece la transformación (es decir, la fase austenítica puede estar subenfriada). Temperaturas más bajas de transformación dan una estructura más fina y fuerte (figura 12-19), influyen en el tiempo necesario para la transformación y hasta alteran la distribución de las dos fases. Esta información está contenida en el **diagrama de**

TABLA 12-1 ■ Efecto del carbono en la resistencia de los aceros

Carbono %	Enfriamiento lento (perlita gruesa)			Enfriamiento rápido (perlita fina)		
	Resistencia a la fluencia (psi)	Resistencia a la tensión (psi)	% de elongación	Resistencia a la fluencia (psi)	Resistencia a la tensión (psi)	% de elongación
0.20	42 750	57 200	36.5	50 250	64 000	36.0
0.40	51 250	75 250	30.0	54 250	85 500	28.0
0.60	54 000	90 750	23.0	61 000	112 500	18.0
0.80	54 500	89 250	25.0	76 000	146 500	11.0
0.95	55 000	95 250	13.0	72 500	147 000	9.5

Según Metals Progress Materials and Processing Databook, 1981.

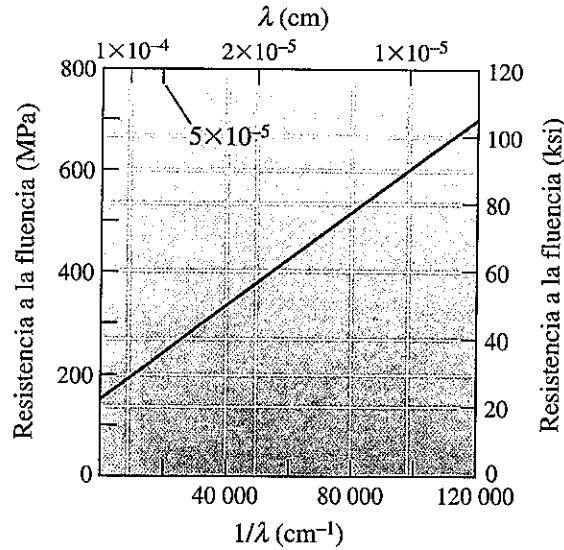


Figura 12-18
Efecto de la separación entre láminas en la resistencia a la fluencia de la perlita.

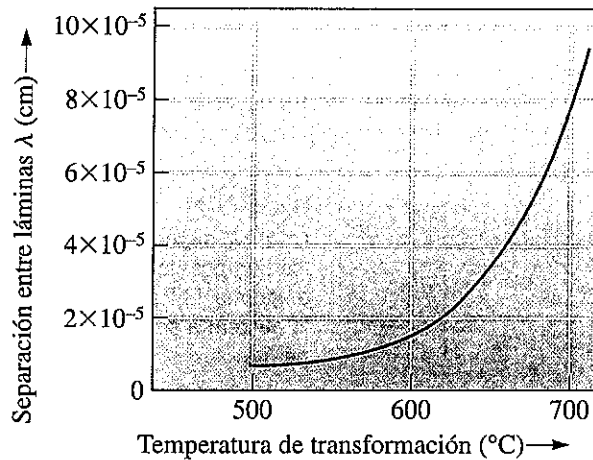


Figura 12-19
Efecto de la temperatura de transformación de la austenita en la separación entre láminas en perlita.

tiempo-temperatura-transformación (TTT) (figura 12-20). Este diagrama, también llamado diagrama de **transformación isotérmica (TI)** o curva C, permite pronosticar la estructura, propiedades y tratamiento térmico necesario en aceros.

La forma del diagrama TTT es una consecuencia de la cinética de la reacción eutéctode y es semejante al diagrama ilustrado por la relación de Avrami (figura 12-3). A cualquier temperatura particular, una curva sigmoide describe la rapidez a la que la austenita se transforma en una mezcla de ferrita y cementita (figura 12-21). Se requiere de un tiempo de incubación para la nucleación. La curva P_s (inicio de perlita) representa el tiempo en el que la austenita empieza a transformarse en ferrita y cementita por medio de la transformación eutéctode. La curva sigmoide también da el tiempo en el que la transformación está completa; este tiempo está dado por la curva P_f (acabado de perlita). Cuando la temperatura desciende de 727 °C, aumenta la rapidez de nucleación, en tanto que disminuye la rapidez de crecimiento del microconstituyente. Al igual que en la figura 12-3, se encuentra una rapidez máxima de transformación, o tiempo mínimo de transformación; la rapidez máxima de transformación ocurre cerca de 550 °C para un acero eutéctode (figura 12-20).

Se producen dos tipos de microconstituyentes como resultado de la transformación. Se forma perlita (P) arriba de 550 °C y se forma bainita (B) a temperaturas más bajas.

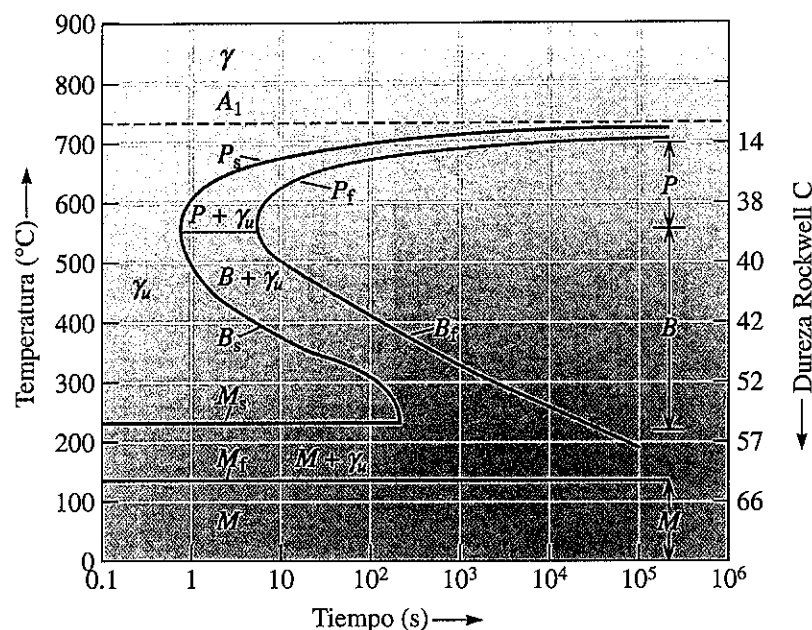


Figura 12-20 Diagrama de tiempo-temperatura-transformación (TTT) para un acero eutectoide, donde P = perlita, B = bainita y M = martensita. Los subíndices "s" y "f" indican el inicio y terminación de una transformación. γ_u es austenita inestable.

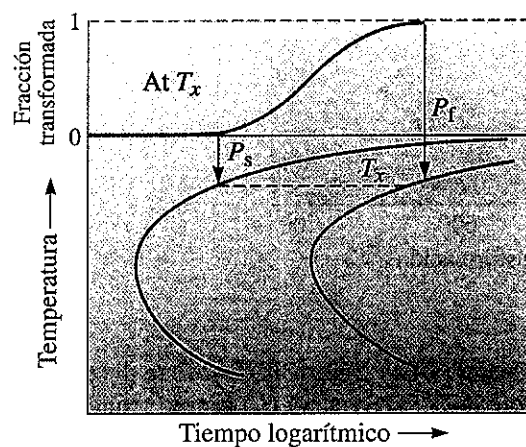


Figura 12-21

La curva sigmoide está relacionada con los tiempos de inicio y terminación en el diagrama TTT para el acero. En este caso, la austenita se está transformando en perlita.

Formación de núcleos y crecimiento de fases en la perlita: Si se temple justo abajo de la temperatura eutectoide, la austenita se enfría sólo ligeramente. Se requieren tiempos prolongados para que se formen núcleos estables de ferrita y cementita. Después de que las fases que forman perlita nucleen, los átomos se difunden rápidamente y se produce perlita gruesa; la transformación está completa al tiempo de terminación de la perlita (P_f). La austenita templada a menor temperatura se subenfía mucho más. En consecuencia, la nucleación ocurre con más rapidez y el P_s es más corto. La difusión también es más lenta, sin embargo, de modo que los átomos se difunden sólo a cortas distancias y se produce perlita fina. Aun cuando las magnitudes de rapidez de crecimiento son más lentas, el tiempo total necesario para la transformación se reduce debido al tiempo más corto de incubación. La perlita más fina se forma en tiempos más cortos cuando se reduce la temperatura isotérmica de transformación a unos 550 °C, que es la nariz, o rodilla, de la curva TTT (figura 12-20).

Formación de núcleos y crecimiento de fases en la bainita: A una temperatura justo debajo de la nariz del diagrama TTT, la difusión es muy lenta y aumentan los tiempos totales de transfor-

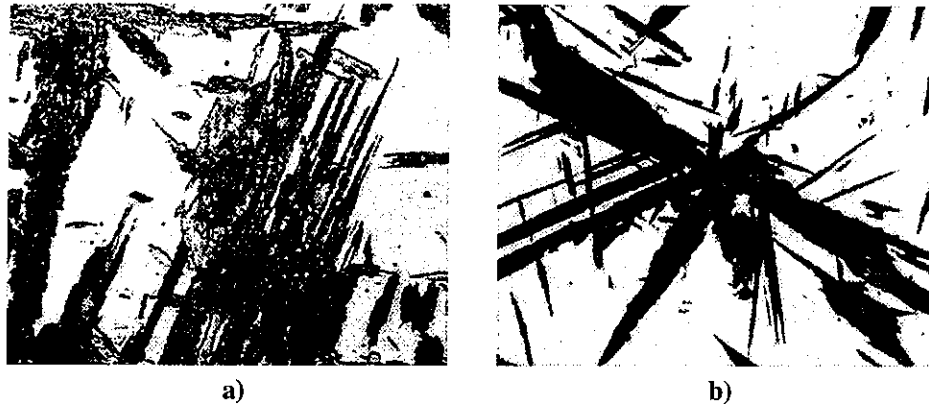


Figura 12-22 a) Bainita superior (placas grises, con forma de plumas) (600 $\times$). b) Bainita inferior (agujas oscuras) (400 $\times$). (De ASM Handbook, vol. 8, (1973), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.)

mación. Además, ¿se encuentra una microestructura diferente! A bajas temperaturas de transformación, las laminillas en la perlita tendrían que ser extremadamente delgadas y, en consecuencia, el área límite entre la ferrita y las laminillas de Fe_3C sería muy grande. Debido a la energía asociada con la interfaz de ferrita-cementita, la energía total del acero tendría que ser muy alta. El acero puede reducir su energía interna al permitir que la cementita se precipite como partículas redondas y discretas en una matriz de ferrita. Este nuevo microconstituyente, o distribución de ferrita y cementita, se denomina **bainita**. La transformación empieza en el tiempo de inicio de bainita (B_s) y termina en el tiempo de terminación de bainita (B_f).

Los tiempos necesarios para que la austenita inicie y termine su transformación en bainita aumentan y ésta se hace más fina cuando sigue disminuyendo la temperatura de transformación. La bainita que se forma justo debajo de la nariz de la curva se denomina bainita gruesa, superior o plumosa. La bainita que se forma a temperaturas más bajas recibe el nombre de bainita fina, inferior o acicular. La figura 12-22 muestra microestructuras comunes de la bainita. Nótese que la morfología de la bainita depende del tratamiento térmico que se utilice.

La figura 12-23 muestra el efecto de la temperatura de transformación en las propiedades de un acero eutectoide (0.77% C). Cuando la temperatura disminuye, hay una tendencia

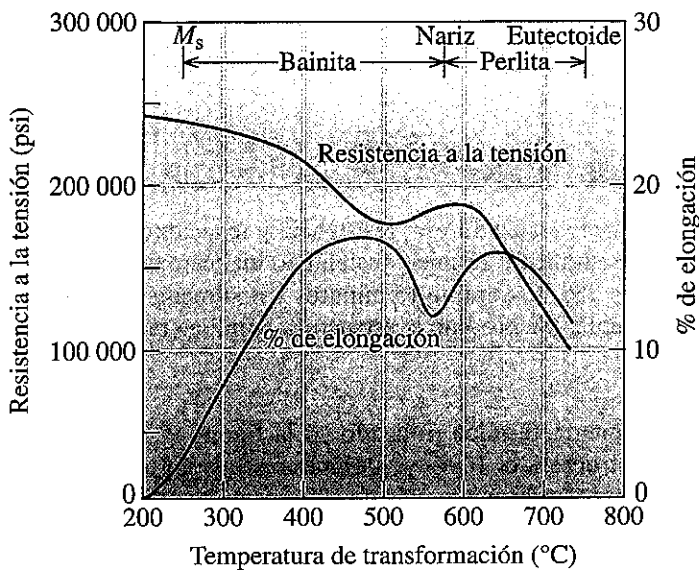


Figura 12-23 Efecto de la temperatura de transformación en las propiedades de un acero eutectoide.

general hacia una resistencia más alta y menor ductilidad debido a la microestructura más fina que se produce. Los siguientes dos ejemplos ilustran la forma en que es posible diseñar tratamientos térmicos de aceros para producir microestructuras y propiedades deseadas.

Ejemplo 12-7

Diagrama de transformación de fase de un acero eutectoide

Diseñe un tratamiento térmico para producir la estructura de perlita que se muestra en la figura 12-15b).

SOLUCIÓN

Primero, se necesita determinar la separación entre láminas de la perlita. Si se cuenta el número de separaciones entre láminas arriba a la derecha en la figura 12-15b), y se recuerda que la separación entre láminas se mide de una placa α a la siguiente placa α , se encuentran 14 espacios en una distancia de 2 cm. Debido al factor de ampliación de 2000, estos 2 cm de distancia son en realidad 0.001 cm. Entonces,

$$\lambda = \left[\frac{0.001 \text{ cm}}{14 \text{ espacios}} \right] = 7.14 \times 10^{-5} \text{ cm}$$

Si se supone que la perlita se forma por una transformación isotérmica, se determina en la figura 12-19 que la temperatura de transformación debe haber sido aproximadamente de 700 °C. Del diagrama TTT (figura 12-20), el tratamiento térmico debería ser

1. Calentar el acero a unos 750 °C y mantenerlo así, quizá 1 hora, para producir sólo austenita. Una temperatura más alta puede producir un crecimiento excesivo de granos de austenita.
2. Templar a 700 °C y mantenerlo así al menos 10^5 s (el tiempo P_f). Se supone aquí que el acero se enfría instantáneamente a 700 °C. En la práctica, esto no sucede y, por tanto, la transformación no ocurre a una sola temperatura. Es posible que sea necesario usar los diagramas de transformación de enfriamiento continuo para ser más precisos (véase el capítulo 13).
3. Enfríe a temperatura ambiente.

El acero debería tener una dureza de DRC 14 (figura 12-20) y una resistencia a la fluencia de unos 200 MPa (30 000 psi).

Ejemplo 12-8

Tratamiento térmico de un acero eutectoide para obtener bainita

Excelentes combinaciones de dureza, resistencia y tenacidad se obtienen de la bainita. Una planta para tratamiento térmico austenizó un acero eutectoide a 750 °C, lo templó y lo mantuvo a 250 °C durante 15 minutos y finalmente permitió que se enfriara a temperatura ambiente. ¿Se produjo la estructura bainítica requerida?

SOLUCIÓN

Examine el tratamiento térmico utilizado en la figura 12-20. Después de calentar a 750 °C, la microestructura es 100% γ . Después de templar a 250 °C, permanece austenita inestable durante ligeramente más de 100 s, cuando empieza a crecer bainita fina. Después de 15 minutos, o 900 s, se ha formado alrededor de 50% de bainita fina y el resto del acero todavía contiene austenita inestable. Como se verá más adelante, la austenita

inestable se transforma en martensita cuando el acero se enfría a temperatura ambiente, y la estructura final es una mezcla de bainita y martensita dura y quebradiza. ¡El tratamiento térmico no fue bueno! La planta de tratamiento debió haber mantenido el acero a 250 °C por lo menos 10^4 s, o sea unas 3 horas.

12-11 La reacción martensítica y el revenido

La **martensita** es una fase que se forma como resultado de una transformación de estado sólido sin difusión. En esta transformación no hay difusión y, por tanto, no sigue la cinética de transformación de Avrami. La rapidez de crecimiento en **transformaciones martensíticas** (también conocidas como **transformaciones displasivas** o **atéricas**) es tan alta que la formación de núcleos se convierte en el paso de control.

El cobalto, por ejemplo, se transforma de una estructura cristalina CCCa en una CH, mediante un ligero cambio en las ubicaciones atómicas que altera la secuencia de apilamiento de los planos compactos. Como la reacción no depende de la difusión, la reacción de la martensita es una transformación atérica, es decir, la reacción depende sólo de la temperatura, no del tiempo. Es frecuente que la reacción martensítica prosiga a gran velocidad, con una rapidez que se aproxima a la velocidad del sonido en el material.

Muchas otras aleaciones (por ejemplo Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni y Ni-Ti) y materiales de cerámica muestran transformaciones de fase martensíticas. Estas transformaciones también pueden ser activadas por la aplicación de esfuerzos mecánicos. Otro material diferente de la martensita que se forma en ciertos tipos de aceros, la aleación Ni-Ti, conocida como **nitinol**, es quizá el ejemplo mejor conocido de aleaciones que usan transformaciones de fase martensítica. Estos materiales pueden recordar su forma y se conocen como aleaciones con memoria de forma (AMF). (Véase la sección 12-12.)

Martensita en aceros En aceros con menos de alrededor de 0.2% C, al templarse, la austenita CCCa se puede transformar en una estructura martensítica CCCu sobresaturada sin equilibrio. En aceros con contenido mayor de carbono, la reacción martensítica se presenta cuando la austenita CCCa se transforma en martensita TCCu (tetragonal centrada en el cuerpo). La relación entre la austenita CCCa y la martensita TCCu [figura 12-24a)] muestra que los átomos de carbono, del tipo $(1/2, 0, 0)$ de sitios intersticiales de la celda CCCa, pueden quedar atrapados durante la transformación a una estructura centrada en el cuerpo, ocasionando que se produzca la estructura tetragonal. Cuando aumenta el contenido de carbono del acero, un gran número de átomos de carbono quedan atrapados en estos sitios, con lo cual aumenta la diferencia en longitud entre los ejes a y c de la martensita [figura 12-24b)].

El acero debe ser templado, o enfriado rápidamente, a partir de la región austenítica estable, para evitar la formación de perlita, bainita o microconstituyentes primarios. La reacción martensítica empieza en un acero eutectoide cuando la austenita se enfría por debajo de 220 °C, que es la temperatura de inicio de la martensita (M_s) (figura 12-20). La cantidad de martensita aumenta cuando disminuye la temperatura. Cuando la temperatura pasa por debajo de la temperatura de terminación de la martensita (M_f), el acero debe contener 100% de martensita. A cualquier temperatura intermedia, la cantidad de martensita no cambia cuando aumenta el tiempo a esa temperatura.

Debido a la conservación de la masa, la composición de la martensita debe ser igual a la de la austenita de la cual se forma. No hay difusión de largo alcance durante la transformación que pueda cambiar la composición. Entonces, en aleaciones de hierro y carbono, la composición inicial de austenita y la composición final de martensita son iguales. El siguiente ejemplo ilustra la forma en que se usa un tratamiento térmico para producir un acero de dos fases.

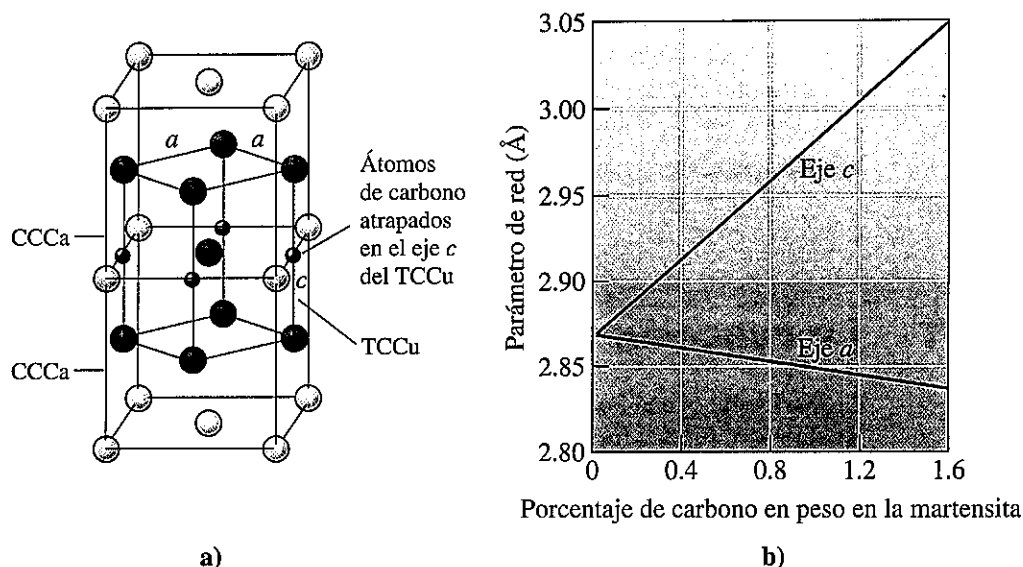


Figura 12-24 a) La celda unitaria de la martensita TCCu está relacionada con la celda unitaria de austenita CCCa. b) Cuando aumenta el porcentaje de carbono, más sitios intersticiales son llenados por los átomos de carbono, y la estructura tetragonal de la martensita se hace más pronunciada.

Ejemplo 12-9

Diseño de un acero con una microestructura de dos fases

Es posible obtener combinaciones poco comunes de propiedades al producir un acero con una microestructura que contenga 50% de ferrita y 50% de martensita. La martensita proporciona resistencia y, la ferrita, ductilidad y tenacidad. Diseñe un tratamiento térmico para producir un acero de dos fases en el que la composición de la martensita sea de 0.60% C.

SOLUCIÓN

Para obtener una mezcla de ferrita y martensita, es necesario dar un tratamiento térmico a un acero hipoeutectoide en la región $\alpha + \gamma$ del diagrama de fases. El acero se temple entonces, permitiendo que la porción γ de la estructura se transforme en martensita.

La temperatura para el tratamiento térmico la fija el requerimiento de que el contenido de martensita sea de 0.60% C. De la línea de solubilidad entre las regiones γ y $\alpha + \gamma$, se encuentra que 0.60% C se obtiene en la austenita cuando la temperatura es alrededor de 750 °C. Para producir 50% de martensita, se necesita seleccionar un acero que dé 50% de austenita cuando el acero se mantenga a 750 °C. Si el contenido de carbono del acero es x , entonces

$$\% \gamma = \left[\frac{(x - 0.02)}{(0.60 - 0.02)} \right] \times 100 = 50 \text{ o } x = 0.31\% \text{ C}$$

El diseño final es

1. Seleccione un acero hipoeutectoide que contenga 0.31% C.
2. Caliente el acero a 750 °C y manténgalo así (quizá 1 hora, dependiendo del grosor de la pieza) para producir una estructura que contenga 50% de ferrita y 50% de austenita, con 0.60% C en la austenita.
3. Temple el acero a temperatura ambiente. La austenita se transforma en martensita, que también contiene 0.60% C.

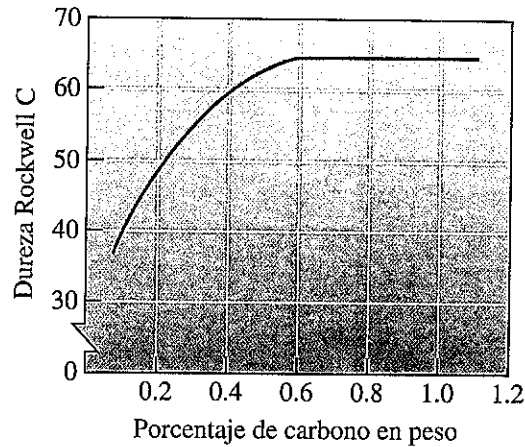


Figura 12-25

Efecto del contenido de carbono en la dureza de la martensita en aceros.

Propiedades de la martensita en el acero

La martensita en los aceros es muy dura y quebradiza, como la cerámica. La estructura cristalina TCCu no tiene planos de deslizamiento o falla en donde se puedan mover con facilidad las dislocaciones. La martensita está altamente sobresaturada con carbono, dado que por lo general el hierro contiene menos de 0.0218% C a temperatura ambiente, y la martensita contiene la cantidad de carbono presente en el acero. Por último, la martensita tiene un tamaño fino de grano y una estructura incluso más fina dentro de los granos.

La estructura y propiedades de martensitas en el acero dependen del contenido de carbono en la aleación (figura 12-25). Cuando es bajo el contenido de carbono, la martensita crece en una forma como de "listones", compuesta de atados de placas planas y angostas que crecen una al lado de la otra [figura 12-26a)]. Esta martensita no es muy dura. Con un contenido más alto de carbono, crece la martensita en placas, en la que crecen placas planas y angostas individualmente más que como atados [figura 12-26b)]. La dureza es mucho mayor en la estructura de martensita en placas, de contenido carbono más alto, en parte debido a la mayor distorsión o a una relación c/a grande, de la estructura cristalina.

Revenido de la martensita en el acero

La martensita no es una fase en equilibrio. Ésta es la razón por la que no aparece en el diagrama de fases de Fe-Fe₃C (figura 12-14). Cuando la martensita en un acero se calienta debajo de la temperatura eutec-

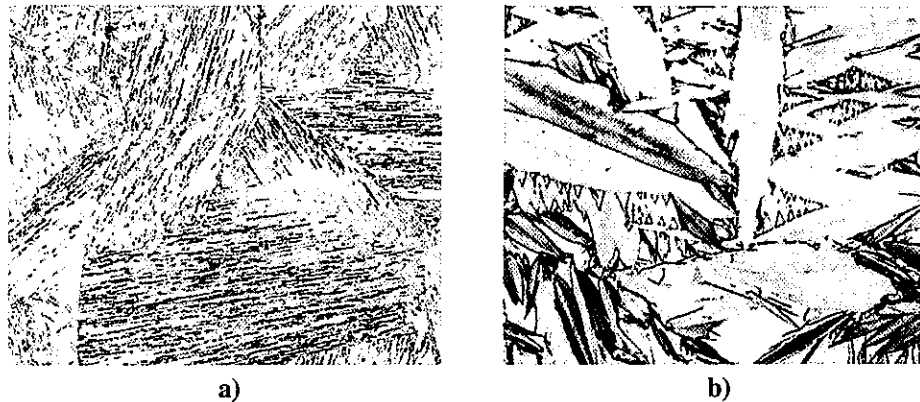


Figura 12-26 a) Martensita en "listones" en acero al bajo carbono (80×). b) Martensita en placas en acero de alto carbono (400×). (De ASM Handbook, vol. 8 (1973), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.)

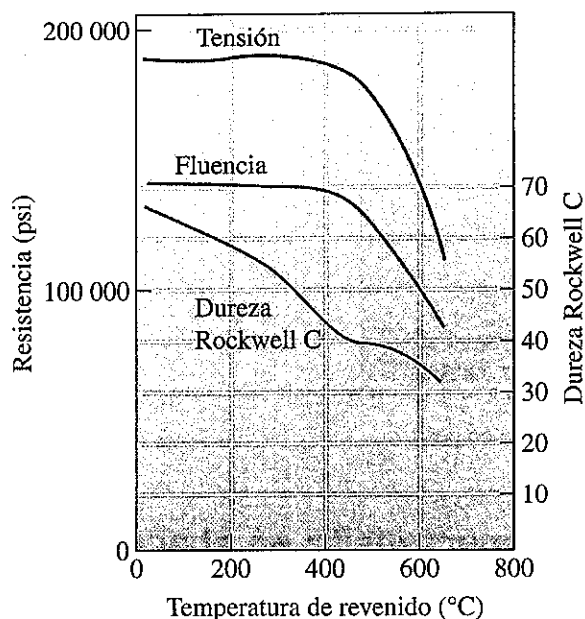


Figura 12-27

Efecto de la temperatura de revenido en las propiedades de un acero eutectoide.

toide, las fases termodinámicamente estables de α y Fe_3C se precipitan. Este proceso se denomina **revenido**. La descomposición de la martensita en aceros ocasiona que la resistencia y dureza del acero se reduzca, al mismo tiempo que mejoran las propiedades de ductilidad e impacto (figura 12-27). Nótese que el término de revenido aquí es diferente del término que se usa para el templado de vidrios de silicato. En el templado de vidrios y revenido de aceros, no obstante, el resultado clave es un aumento en la tenacidad del material.

A bajas temperaturas de revenido, la martensita puede formar dos fases de transición, una martensita con un contenido más bajo en carbono y un carburo ϵ muy fino y sin equilibrio, o $\text{Fe}_{2.4}\text{C}$. El acero es aún fuerte, quebradizo y quizá hasta más duro que antes del revenido. A temperaturas más altas, se forman los α y Fe_3C estables, y el acero se hace más blando y más dúctil. Si el acero se reviene precisamente abajo de la temperatura eutectoide, el Fe_3C se hace muy grueso y el efecto de endurecimiento por dispersión se reduce en gran medida. Si se selecciona la temperatura apropiada de revenido, se puede obtener una amplia variedad de propiedades. El producto del proceso de revenido es un microconstituyente denominado martensita revenida (figura 12-28).

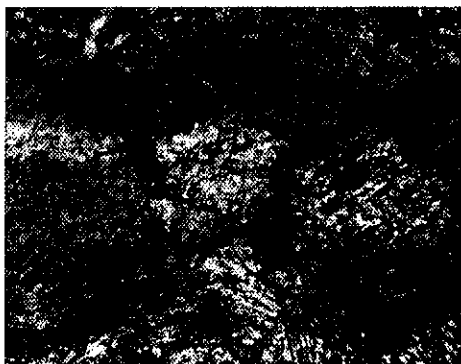


Figura 12-28

Martensita revenida en acero (500 $\times$). (De ASM Handbook, vol. 9, *Metallography and Microstructure* (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.)

Martensita en otros sistemas

Las características de la reacción martensítica son diferentes en otros sistemas de aleación. Por ejemplo, se puede formar martensita en aleaciones con base de hierro que contienen poco o nada de carbono, por medio de una transformación de la estructura cristalina CCCa en una estructura cristalina CCCu. En ciertos aceros al alto manganeso y aceros inoxidables, la estructura CCCa cambia a una estructura cristalina CH durante la transformación martensítica. Además, la reacción martensítica ocurre durante la transformación de numerosos materiales cerámicos polimórficos, incluyendo ZrO_2 e incluso en algunos polímeros cristalinos. Entonces, los términos reacción martensítica y martensita son más bien genéricos. En el contexto de propiedades, microestructura y tratamiento térmico de los aceros, el término "martensita" se refiere a la fase dura y quebradiza TCCu obtenida al templar aceros.

Las propiedades de la martensita en otras aleaciones son también diferentes con respecto de las propiedades de la martensita de acero. En aleaciones de titanio, el titanio CCCu se transforma en una estructura martensítica CH durante el templado, pero la martensita de titanio es más blanda y débil que la estructura original. La martensita que se forma en otras aleaciones también se puede revenir. La martensita producida en aleaciones de titanio se puede recalentar para permitir la precipitación de una segunda fase, pero, a diferencia del caso del acero, el proceso de revenido *aumenta*, en lugar de disminuir, la resistencia de la aleación de titanio.

12-12 Las aleaciones con memoria de forma [AMF]

El efecto de memoria de forma es una propiedad única que tiene algunas aleaciones que son sometidas a la reacción martensítica. Estas aleaciones pueden ser procesadas usando un tratamiento termomecánico de alta tecnología para producir una estructura martensítica. Al final del proceso de tratamiento, el material se deforma en una forma predeterminada. El metal entonces se puede deformar en una segunda forma, pero cuando se aumenta la temperatura el metal regresa a su forma original. Los frenos de ortodoncia, los filtros de coágulos, motores, antenas para teléfonos celulares, monturas para lentes, así como activadores para sistemas inteligentes, se han perfeccionado usando estos materiales. Se han inventado aletas que cambian la dirección de la corriente de viento, que dependen de la temperatura, para aplicarlas en acondicionadores de aire.

Más recientemente, también se ha inventado una clase especial de materiales conocida como aleaciones ferromagnéticas con memoria de forma. Ejemplos de aleaciones ferromagnéticas con memoria de forma son los Ni_2MnGa , $Fe-Pd$ y Fe_3Pt . A diferencia del $Ni-Ti$, estos materiales muestran un efecto con memoria de forma en respuesta a un campo magnético. Casi todas las aleaciones con memoria de forma que incluyen $Ni-Ti$ no son ferromagnéticas. Ya se vio en el capítulo 6 que muchos polímeros son viscoelásticos, y el componente viscoso se recupera con el tiempo. De este modo, ¡muchos polímeros tienen memoria de su forma! Recientemente, investigadores han inventado nuevos plásticos con memoria de forma.

Las aleaciones con memoria de forma exhiben una memoria que puede ser activada por esfuerzo o cambio de temperatura. Los **materiales inteligentes** son aquellos que "sienten" un estímulo externo (por ejemplo esfuerzo, cambio de temperatura, campo magnético, etc.) y experimentan algún tipo de cambio. En forma activa los materiales inteligentes pueden incluso iniciar una respuesta (es decir, funcionan como sensor y activador). Las aleaciones con memoria de forma son una familia de materiales pasivamente inteligentes en que sólo captan un cambio en esfuerzo o en temperatura.

Las aleaciones con memoria de forma también muestran un comportamiento **supere-lástico**. Son posibles deformaciones recuperables de hasta 10%. Ésta es la razón por la cual las aleaciones con memoria de forma se han empleado en forma tan satisfactoria en aplicaciones como alambres de frenos para ortodoncia, monturas para lentes y antenas para teléfonos celulares. En estas aplicaciones, se usa el efecto superelástico (y no el de la memoria de forma).

Ejemplo 12-10**Diseño de un cople para tubería**

A veces, en la práctica es necesario unir tubería de titanio. Diseñe un método para hacer esto rápidamente.

SOLUCIÓN

El titanio es bastante reactivo y, a menos que se utilicen procesos especiales de soldadura, puede contaminarse. En la práctica, es posible que no tenga acceso a estos procesos; por tanto, se desea hacer la unión sin recurrir a procesos de alta temperatura.

Puede aprovechar el efecto de memoria de forma para esta aplicación (figura 12-29). Con anticipación, puede colocar un cople de Ni-Ti en un pequeño diámetro, y luego deformarlo en un diámetro más grande en estado martensítico. En la práctica, el cople, que está en estado martensítico, se desliza sobre la tubería y se calienta (a una temperatura suficientemente baja como para que el tubo de titanio no se contamine). El cople se contrae de nuevo a su forma predeterminada como resultado del efecto de memoria de forma, produciendo así una unión mecánica fuerte para unir los tubos.

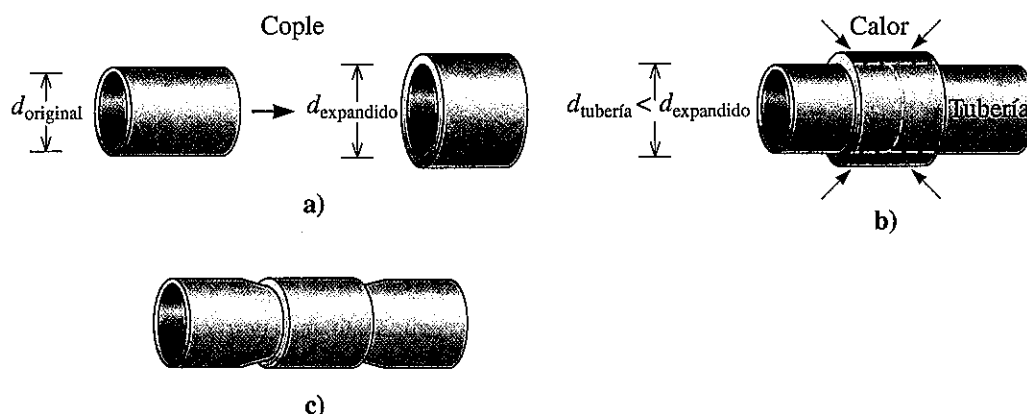


Figura 12-29 Uso de aleaciones de memoria de forma para acoplar tuberías: un cople de aleación de memoria se expande a) para que ajuste sobre el tubo, b) cuando el cople se vuelve a calentar, se encoge de nuevo a su diámetro original, c) apretando la tubería para obtener un ajuste hermético (para el ejemplo 12-10).

Resumen

- Las transformaciones de fase de estado sólido, que tienen un profundo efecto en la estructura y propiedades de un material, pueden ser controladas por medio de tratamientos térmicos apropiados. Estos tratamientos térmicos están diseñados para obtener una distribución óptima de dos o más fases en la microestructura. El endurecimiento por dispersión permite obtener una amplia variedad de estructuras y propiedades.
- Estas transformaciones por lo general requieren formación de núcleos y crecimiento de nuevas fases a partir de la estructura original. La cinética de la transformación de fase ayuda a entender los mecanismos que controlan la reacción y la rapidez a la que ocurre la

reacción, haciendo así posible diseñar el tratamiento térmico para producir la microestructura deseada. La consulta de diagramas de fases apropiados también ayuda a seleccionar las composiciones y temperaturas necesarias.

- El endurecimiento por envejecimiento, o endurecimiento por precipitación, es un poderoso método para controlar el óptimo endurecimiento por dispersión en muchas aleaciones metálicas. En el endurecimiento por envejecimiento, un muy fino precipitado coherente ampliamente disperso se deja precipitar por medio de un tratamiento térmico que incluye a) tratamiento por solución para producir una solución sólida de una sola fase, b) templado para retener esa fase única y c) envejecimiento para permitir que se forme un precipitado. Para que ocurra el endurecimiento por envejecimiento, el diagrama de fases debe mostrar solubilidad decreciente del soluto en el solvente cuando disminuye la temperatura.
- La reacción eutectoide puede ser controlada para permitir que un tipo de sólido se transforme en dos tipos diferentes de sólido. La cinética de la reacción depende de la formación de núcleos de las nuevas fases sólidas, así como de la difusión de los distintos átomos del material, para permitir el crecimiento de las nuevas fases.
- La reacción eutectoide de más amplio uso ocurre al producir aceros a partir de aleaciones de hierro y carbono. Se pueden producir ya sea perlita o bainita como resultado de la reacción eutectoide en el acero. Además, pueden estar presentes ferrita primaria o cementita primaria, dependiendo del contenido de carbono en la aleación. La idea es formular una microestructura que esté formada por la mezcla correcta de fases semejantes al metal que sean fases tenaces y semejantes a la cerámica, es decir, duros y quebradizos.
- Los factores que influyen en las propiedades mecánicas del microconstituyente producido por la reacción eutectoide incluyen a) la composición de la aleación (cantidad de microconstituyente eutectoide), b) el tamaño de grano del sólido original, el microconstituyente eutectoide, y cualesquiera microconstituyentes primarios, c) la finura de la estructura dentro del microconstituyente eutectoide (separación entre láminas), d) la rapidez de enfriamiento durante la transformación de fase, así como e) la temperatura a la que ocurre la transformación (la cantidad de subenfriamiento).
- Ocurre una reacción martensítica sin difusión de largo alcance. De nuevo, la transformación mejor conocida ocurre en aceros:
 - La cantidad de martensita que se forma depende de la temperatura de la transformación (una reacción atermica).
 - La martensita es muy dura y quebradiza, con la dureza determinada principalmente por el contenido de carbono.
 - La cantidad y composición de la martensita son las mismas que las de la austenita de la cual se forma.
- La martensita se puede revenir. Durante el revenido, se produce una estructura endurecida por dispersión. En aceros, el revenido reduce la resistencia y dureza pero mejora la ductilidad y tenacidad.
- Dado que se obtienen propiedades óptimas por medio de un tratamiento térmico, se debe recordar que la estructura y propiedades pueden cambiar cuando se usa el material a elevadas temperaturas, o se expone a éstas. Ocurre un exceso de envejecimiento o un exceso de revenido como extensión natural de los fenómenos que gobiernan estas transformaciones, cuando el material se pone en servicio.
- Las aleaciones con memoria de forma (por ejemplo Ni-Ti) son una clase de materiales inteligentes que pueden recordar su forma. También exhiben un comportamiento superelástico.

Glosario

Aceros que se pueden endurecer en horno Son aceros que pueden presentar un aumento en su esfuerzo a la fluencia, como resultado del endurecimiento por precipitación que puede ocurrir a temperaturas relativamente bajas ($\sim 100^\circ\text{C}$), condiciones que simulan el horneado de pinturas en automóviles. Este aumento adicional conduce a una mejor resistencia contra las abolladuras.

Ángulo diedro Ángulo que define la forma de una partícula de precipitado en la matriz. El ángulo diedro está determinado por las energías relativas superficiales, de la energía de límite del grano de la matriz, así como de la energía interfacial de la matriz-precipitado.

Austenita Nombre dado a la estructura cristalina CCCa del hierro y aleaciones de hierro y carbono.

Bainita Microconstituyente de dos fases, que contiene ferrita y cementita, que se forma en aceros que están transformados de manera isotérmica a temperaturas relativamente bajas.

Cementita Compuesto de Fe_3C duro, quebradizo, semejante a la cerámica que, cuando se dispersa de forma apropiada, proporciona un reforzamiento en los aceros.

Comportamiento superelástico Las aleaciones con memoria de forma, deformadas arriba de una temperatura crítica, muestran una gran deformación elástica reversible como resultado de una transformación martensítica inducida por un esfuerzo.

Diagrama de tiempo-temperatura-transformación [TTT] El diagrama TTT describe el tiempo necesario a cualquier temperatura para que una transformación de fase se inicie y termine. El diagrama TTT supone que la temperatura es constante durante la transformación.

Efecto de memoria de forma Capacidad de ciertos materiales para desarrollar microestructuras que, después de ser deformadas, pueden regresar el material a su forma inicial cuando se calientan (por ejemplo aleaciones de Ni-Ti).

Endurecimiento por envejecimiento Tratamiento térmico especial por endurecimiento por dispersión. Por tratamiento por solución, templado y envejecimiento, se forma un precipitado coherente que proporciona un efecto considerable de endurecimiento. (También conocido como endurecimiento por precipitación.)

Endurecimiento por precipitación Véase Endurecimiento por envejecimiento.

Energía de deformación Es la energía necesaria para permitir que un precipitado se ajuste en la matriz circundante durante la formación de núcleos y crecimiento del precipitado.

Energía interfacial Energía asociada con el límite entre dos fases.

Envejecimiento artificial Recalentamiento de una aleación tratada por solución y templada a una temperatura debajo de solvus, con el fin de proporcionar la energía térmica necesaria para que se forme un precipitado.

Envejecimiento natural Cuando un precipitado coherente se forma a partir de una aleación que se puede endurecer por envejecimiento, tratada por solución y templada, a temperatura ambiente, produciendo un endurecimiento óptimo.

Estructura Widmanstätten La precipitación de una segunda fase desde la matriz cuando hay una relación fija cristalográfica entre el precipitado y las estructuras cristalinas de la matriz. En la estructura Widmanstätten es frecuente que se formen estructuras semejantes a agujas o placas.

Ferrita Nombre dado a la estructura cristalina CCCu del hierro que puede ocurrir como α o δ . No debe confundirse con ferritas de cerámica, que son materiales magnéticos.

Martensita Fase metaestable formada en aceros y otros materiales por transformación atómica y sin difusión.

Materiales inteligentes Materiales que pueden detectar un estímulo externo (por ejemplo esfuerzo, presión, cambio de temperatura, campo magnético, etc.) e iniciar una respuesta. Los materiales pasivamente inteligentes pueden captar estímulos externos; los materiales activamente inteligentes tienen capacidad sensorial y de actuación.

Nitinol Aleación de níquel-titanio con memoria de su forma.

Perlita Microconstituyente laminar de dos fases, que contiene ferrita y cementita, que se forma en aceros enfriados en forma normal o transformados de manera isotérmica a temperaturas relativamente altas.

Precipitado coherente Precipitado con una estructura cristalina y distribución atómica que tiene una relación continua con la matriz de la cual se forma el precipitado. El precipitado coherente proporciona una excelente disrupción de la distribución atómica de la matriz y produce un excelente endurecimiento.

Relación de Avrami Describe la fracción de una transformación que ocurre como función del tiempo. Esto describe casi todas las transformaciones de estado sólido que involucran difusión; en consecuencia, no se describen transformaciones martensíticas.

Solución sólida sobresaturada Solución sólida formada cuando un material es enfriado rápidamente, desde una región de alta temperatura y una sola fase a una región de baja temperatura y dos fases, sin que se precipite la segunda fase. Como la fase de templado contiene más elemento de aleación que el límite de solubilidad, está sobresaturada en ese elemento.

Revenido Tratamiento térmico empleado para reducir la dureza de la martensita al permitir que ésta se descomponga en las fases de equilibrio. Esto conduce a obtener mayor tenacidad.

Transformación atérmica Cuando la cantidad de la transformación depende sólo de la temperatura, no del tiempo (igual que la transformación martensítica o transformación displasiva).

Transformación displasiva Transformación de fase que ocurre por medio de pequeños desplazamientos de átomos o de iones y sin difusión. Es igual que la transformación atérmica o martensítica.

Transformación isotérmica Cuando la cantidad de una transformación a una temperatura particular depende del tiempo permitido para la transformación.

Transformación martensítica Transformación de fase que ocurre sin difusión. Igual que la transformación atérmica o displasiva. Ésta ocurre en aceros, Ni-Ti, y muchos materiales cerámicos.

Tratamiento por solución Primer paso en el tratamiento térmico de endurecimiento por envejecimiento. La aleación se calienta arriba de la temperatura de solvus para disolver cualquier segunda fase y producir una estructura homogénea de una sola fase.

Zonas de Guinier-Preston [GP] Grupos de átomos que se precipitan de la matriz en las primeras etapas del proceso de endurecimiento por envejecimiento. Aun cuando las zonas GP son coherentes con la matriz, son demasiado pequeñas para producir un endurecimiento óptimo.

Problemas

Sección 12-1 Formación de núcleos y crecimiento en reacciones en estado sólido

- 12-1** a) Determine el tamaño crítico del núcleo r^* para la nucleación homogénea, para la precipitación de la fase β en una matriz de fase α . *Sugerencia:* El tamaño crítico de núcleos ocurre en el máximo de la expresión para $\Delta G(r)$ en la ecuación 12-1. b) Grafique el cambio ΔG total de energía libre como función del radio del precipitado. c) Comente sobre el valor de r^* para la nucleación homogénea para precipitación en estado sólido cuando se compare con la transformación de líquido a sólido.
- 12-2** ¿Cómo difiere la ecuación para la formación de núcleos de una fase en estado sólido, respecto de aquella para una transformación de líquido a sólido?
- 12-3** Determine las constantes c y n en la ecuación 12-2 que describen la rapidez de cristalización del polipropileno a 140 °C. (Véase la figura 12-30.)

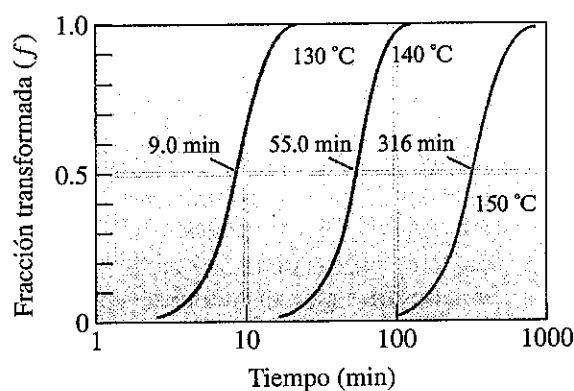


Figura 12-30 Efecto de la temperatura en la cristalización del polipropileno (para problemas 12-3 y 12-5).

- 12-4** Determine las constantes c y n en la ecuación 12-2 que describen la rapidez de recristalización del cobre a 135 °C. (Véase la figura 12-2.)

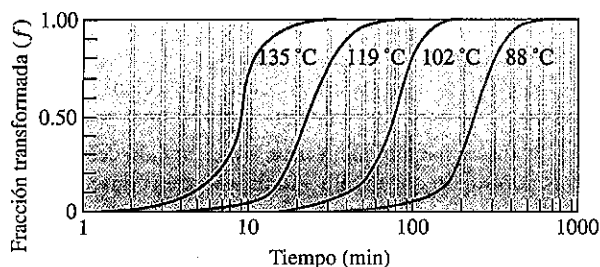


Figura 12-2 (Repetida para el problema 12-4.) Efecto de la temperatura en la recrystalización del cobre trabajado en frío.

- 12-5** Determine las constantes c y n de la ecuación 12-2 que describen la rapidez de cristalización del polipropileno a 150 °C. (Véase la figura 12-30.)
- 12-6** La mayor parte de las transformaciones de fase en estado sólido siguen la ecuación de Avrami. ¿Verdadero o falso? Explique brevemente.
- 12-7** ¿Qué paso controla la rapidez de recrystalización de un metal trabajado en frío?

Sección 12-2 Aleaciones endurecidas al exceder el límite de solubilidad

- 12-8** ¿Cuáles son las diferentes formas por las cuales se puede hacer que una segunda fase se precipite en una microestructura de dos fases?
- 12-9** Explique por qué la segunda fase en aleaciones de Al-4% Cu forma núcleos y crece a lo largo de límites de granos cuando se enfría lentamente. ¿Por lo general esto es deseable?
- 12-10** ¿Qué significan los términos precipitados “coherentes” e “incoherentes”?
- 12-11** ¿Qué propiedades de la fase del precipitado son necesarias para el endurecimiento de la precipitación? ¿Por qué?
- 12-12** La electromigración, es decir una difusión de átomos/iones debida a la transferencia de cantidad de movimiento desde electrones de alta energía, lleva a interconexiones de huecos del aluminio empleados en numerosos procesos de metalización de semiconductores, por lo cual es una causa principal de problemas de confiabilidad de los dispositivos en la industria. Proponga un aditivo para el Al que pueda ayudar a mitigar este problema. Por favor consulte el diagrama de fases apropiado para justificar sus respuestas.

Sección 12-3 Endurecimiento por envejecimiento o por precipitación

- 12-13** ¿Cuál es el principio del endurecimiento por precipitación?
- 12-14** ¿Cuál es la diferencia entre endurecimiento por precipitación y endurecimiento por dispersión?
- 12-15** ¿Qué es una solución sobresaturada? ¿Cómo se obtienen soluciones sobresaturadas durante el endurecimiento por precipitación? ¿Por qué es necesaria la formación de una solución sobresaturada?
- 12-16** ¿Por qué los precipitados formados durante el endurecimiento por precipitación se forman en toda la microestructura y no sólo en los límites de granos?
- 12-17** En envejecimiento durante tiempos más largos, ¿por qué crecen los precipitados de segunda fase? ¿Cuál es la fuerza motriz? Compare esto con las fuerzas motrices para el crecimiento de granos y sinterización en estado sólido.

Sección 12-4 Aplicaciones de aleaciones endurecidas por envejecimiento

- 12-18** ¿Por qué el endurecimiento por precipitación es un mecanismo atractivo de endurecimiento para materiales de aeronaves?
- 12-19** ¿Por qué casi todas las aleaciones endurecidas por precipitación son apropiadas sólo para aplicaciones a baja temperatura?

Sección 12-5 Evolución microestructural en endurecimiento por envejecimiento o por precipitación

- 12-20** Explique los tres pasos básicos encontrados durante el endurecimiento por precipitación.
- 12-21** Explique cómo puede ocurrir la fragilidad en caliente en aleaciones endurecidas por precipitación.
- 12-22** En el endurecimiento por precipitación, ¿la fase que produce el endurecimiento se forma directamente de la fase sobresaturada de matriz? Explique.
- 12-23** a) Recomiende un tratamiento térmico para el endurecimiento por envejecimiento artificial para una aleación de Cu-1.2% Be. (Véase la figura 12-33 de la página 489.) Incluya temperaturas apropiadas.
b) Compare la cantidad del precipitado γ_2 que se forma por envejecimiento artificial a 400 °C con la cantidad de precipitado que se forma por envejecimiento natural.
- 12-24** Suponga que el endurecimiento por envejecimiento es posible en el sistema Al-Mg. (Véase la figura 12-10.)

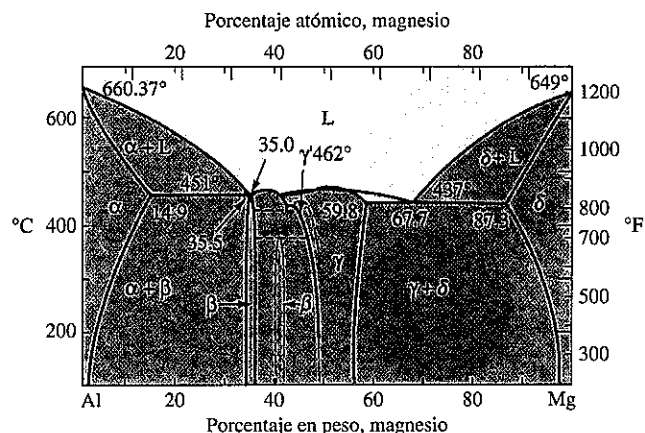


Figura 12-10 (Repetida para el problema 12-24.) Parte del diagrama de fases de aluminio-magnesio.

- Recomiende un tratamiento térmico de endurecimiento por envejecimiento artificial para cada una de las siguientes aleaciones, y
- compare la cantidad del precipitado β que se forma de su tratamiento de cada aleación: i) Al-4% Mg, ii) Al-6% Mg, iii) Al-12% Mg.
- Pruebas de la aleación efectuadas después del tratamiento térmico revelan que ocurre un pequeño endurecimiento como resultado de dicho tratamiento térmico. ¿Cuáles de los requerimientos del endurecimiento por envejecimiento no fueron satisfechos?

12-25 Una solución de Al-2.5% Cu es creada por solución, templada y envejecida en exceso a 230 °C para producir una microestructura estable. Si la θ se precipita como esferas con un diámetro de 9000 Å y una densidad de 4.26 g/cm³, determine el número de partículas de precipitado por cm³. (Véase la figura 12-5.)

Sección 12-6 Efectos de la temperatura y del tiempo de envejecimiento

- 12-26** ¿Qué es envejecimiento? ¿Por qué es necesario este paso en el endurecimiento por precipitación?
- 12-27** ¿Qué es exceso de envejecimiento?
- 12-28** ¿Qué significan los términos “envejecimiento natural” y “envejecimiento artificial”?
- 12-29** En el avión en que volaron los hermanos Wright, ¿cómo se endureció por precipitación la aleación?
- 12-30** ¿Por qué el trabajo del doctor Gayle y sus colegas reveló dos conjuntos de precipitados

en la aleación que se usó para hacer el avión de los hermanos Wright?

- 12-31** Con base en los principios de endurecimiento por envejecimiento de aleaciones de Al-Cu, clasifique las siguientes aleaciones de Al-Cu de la más alta a la más baja resistencia a la fluencia máxima, así como el tiempo, del más largo al más corto, necesario a 190 °C para alcanzar la máxima resistencia a la fluencia: Al-2 %pe Cu, Al-3 %pe Cu y Al-4 %pe Cu. Consulte los diagramas de fases de Al-Cu (véase la figura 12-9 repetida en la página siguiente).

12-32 ¿Cuáles técnicas analíticas emplearía usted para caracterizar los precipitados a nanoescala en una aleación?

12-33 ¿Por qué se tienen que conservar algunas aleaciones de aluminio a bajas temperaturas hasta que estén listas para los pasos de su formación?

Sección 12-7 Requisitos para el endurecimiento por envejecimiento

- 12-34** ¿Todas las composiciones de una aleación pueden ser reforzadas usando endurecimiento por precipitación? ¿Es posible usar este mecanismo para el endurecimiento de cerámicas, vidrios o polímeros?
- 12-35** Se va a fabricar un alambre de cobre conductor. ¿Seleccionaría usted el endurecimiento por precipitación como una forma para reforzar este alambre? Explique.
- 12-36** La figura 12-31 muestra un diagrama de fases hipotético. Determine si cada una de las siguientes aleaciones podría ser buena candidata para su endurecimiento por envejecimiento y explique su respuesta. Para las

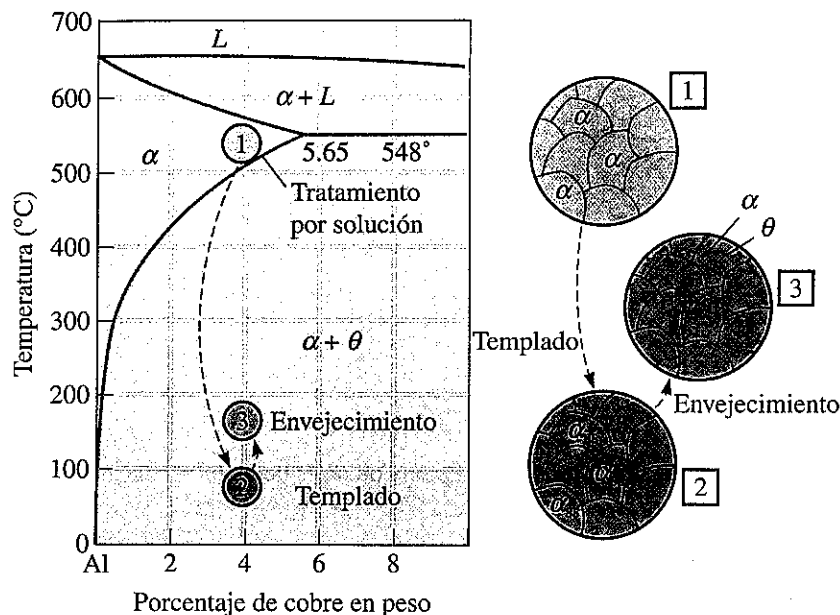


Figura 12-9 (Repetida para el problema 12-31.) El extremo rico en aluminio del diagrama de fases de aluminio-cobre, que muestra los tres pasos del tratamiento térmico para endurecimiento por envejecimiento, así como las microestructuras que se producen.

aleaciones que podrían ser buenas candidatas, describa el tratamiento térmico necesario, incluyendo temperaturas recomendadas.

- A-10% B
- A-20% B
- A-55% B
- A-87% B
- A-95% B

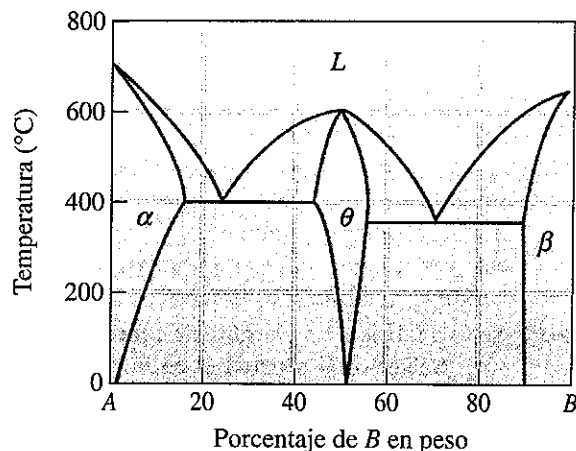


Figura 12-31 Diagrama de fases hipotético (para el problema 12-36).

Sección 12-8 Uso de aleaciones que pueden endurecerse por envejecimiento a altas temperaturas

- 12-37** ¿Cuál es la principal limitación del uso de aleaciones endurecidas por precipitación?
- 12-38** ¿Por qué ciertas aleaciones de aluminio (no basadas en níquel), reforzadas usando endurecimiento por envejecimiento, pueden perder su resistencia al ser soldadas?
- 12-39** ¿Escogería usted una aleación endurecida por precipitación para hacer un bate de béisbol de aleación de aluminio?
- 12-40** ¿Qué tipo de aleaciones endurecidas por dispersión pueden retener su resistencia hasta $\sim 1000^\circ\text{C}$?

Sección 12-9 La reacción eutectoide

- 12-41** Escriba la reacción eutectoide del sistema Fe-Fe₃C.
- 12-42** Trace la microestructura de la perlita formada por enfriamiento lento de un acero con la composición eutectoide.
- 12-43** Compare y contraste las reacciones eutécticas y eutectoides.
- 12-44** ¿Cuáles son las solubilidades de carbono en las formas α , δ y γ del hierro?

- 12-45** Defina los siguientes términos: ferrita, austenita, perlita y cementita.
- 12-46** La microestructura de la perlita es semejante a un nanocompuesto de cerámica-metal. ¿Cierto o falso? Comente.
- 12-47** ¿Qué significan los términos aceros “hipoeutectoide” e “hipereutectoide”?
- 12-48** ¿Cuál es la diferencia entre un microconstituyente y una fase?
- 12-49** Para una aleación de Fe-0.35% C, determine
- la temperatura a la que la austenita empieza primero a transformarse al enfriarse;
 - el microconstituyente primario que se forma;
 - la composición y cantidad de cada fase presente a 728 °C;
 - la composición y cantidad de cada fase presente a 726 °C, y
 - la composición y cantidad de cada microconstituyente presente a 726 °C.
- 12-50** Para una aleación de Fe-1.15% C, determine
- la temperatura a la que la austenita primero empieza a transformarse al enfriarse;
 - el microconstituyente primario que se forma;
 - la composición y cantidad de cada fase presente a 728 °C;
 - la composición y cantidad de cada fase presente a 726 °C, y
 - la composición y cantidad de cada microconstituyente presente a 726 °C.
- 12-51** Un acero contiene 8% de cementita y 92% de ferrita a temperatura ambiente. Estime el contenido de carbono del acero. ¿El acero es hipoeutectoide o hipereutectoide?
- 12-52** Un acero contiene 18% de cementita y 82% de ferrita a temperatura ambiente. Estime el contenido de carbono del acero. ¿El acero es hipoeutectoide o hipereutectoide?
- 12-53** Un acero contiene 18% de perlita y 82% de ferrita primaria a temperatura ambiente. Estime el contenido de carbono del acero. ¿El acero es hipoeutectoide o hipereutectoide?
- 12-54** Un acero contiene 94% de perlita y 6% de cementita primaria a temperatura ambiente. Estime el contenido de carbono del acero. ¿El acero es hipoeutectoide o hipereutectoide?
- 12-55** Un acero contiene 55% α y 45% γ a 750 °C. Estime el contenido de carbono del acero.
- 12-56** Un acero contiene 96% γ y 4% de Fe_3C a 800 °C. Estime el contenido de carbono del acero.
- 12-57** Un acero es calentado hasta que se forma 40% de austenita, con un contenido de carbono de 0.5%. Estime la temperatura y el contenido total de carbono del acero.
- 12-58** Un acero es calentado hasta que se forma 85% de austenita, con un contenido de carbono de 1.05%. Estime la temperatura y el contenido total de carbono del acero.
- 12-59** Los aceros al carbono citados en la tabla siguiente se calentaron a 1000 °C durante una hora para formar austenita y se enfriaron lentamente, bajo condiciones de equilibrio, a temperatura ambiente.
- Consulte el diagrama de fases de Fe-Fe₃C para contestar las siguientes preguntas, para cada una de las composiciones de acero al carbono citadas en la tabla siguiente.
- Determine las cantidades de las fases presentes;
 - determine el contenido de C de cada fase, y
 - grafique el contenido de C de perlita, α y Fe_3C contra la resistencia a la fluencia. Con base en la gráfica, discuta los factores que influyen en la resistencia a la fluencia en aceros con <1% C.

% de carbono	Resistencia a la fluencia (MPa)
0.2	295
0.4	353
0.6	372
0.8	376
0.95	379

- 12-60** Un termocople defectuoso en un horno para tratamiento térmico carburizante, conduce a mediciones no confiables de la temperatura durante el proceso. El análisis de la microestructura del acero carburizado que inicialmente contenía 0.2% de carbono dejó ver que la superficie tenía 93% de perlita y 7% de Fe_3C primaria, mientras que, a una profundidad de 0.5 cm, los microconstituyentes fueron de 99% perlita y 1% Fe_3C primaria. Estime la temperatura a la que se realizó el

tratamiento térmico, si el tratamiento térmico carburizante se realizó durante cuatro horas. Para la difusión intersticial del carbono en hierro CCCa, el coeficiente de difusión $D_0 = 2.3 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ y la energía de activación $Q = 1.38 \times 10^5 \text{ J/mol}$. Puede ser útil consultar las secciones 5-6 y 5-8.

12-61 Determine la temperatura eutectoide, la composición de cada fase en la reacción eutectoide, y la cantidad de cada fase presente en el microconstituyente eutectoide para los siguientes sistemas. Para los sistemas metálicos, comente si se espera que el microconstituyente eutectoide sea dúctil o quebradizo.

- $\text{ZrO}_2\text{-CaO}$ (véase la figura 12-32).
- Cu-Al a 11.8% Al [véase la figura 12-33c)].
- Cu-Zn a 47% Zn [véase la figura 12-33a)].
- Cu-Be [véase la figura 12-33d)].

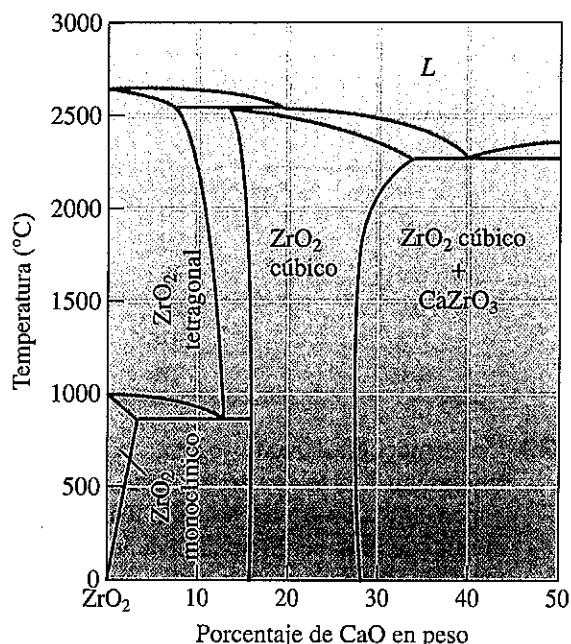


Figura 12-32 Diagrama de fases del $\text{ZrO}_2\text{-CaO}$. Ocurre una transformación polimórfica de fases para el ZrO_2 puro. Al agregar de 16 a 26% de CaO se produce una sola fase de zirconio puro a todas las temperaturas (para el problema 12-61).

Sección 12-10 Control de la reacción eutectoide

12-62 ¿Por qué las distancias entre laminillas, formadas en una reacción eutectoide, están por lo general separadas por distancias menores a las formadas en las reacciones eutécticas?

12-63 Compare la separación entre láminas y la resistencia a la fluencia cuando un acero eutectoide se transforma isotérmicamente en perlita a

- 700 °C y
- 600 °C.

12-64 ¿Por qué un acero eutectoide exhibe diferentes límites elásticos y porcentajes de elongaciones, dependiendo de si se enfrió lenta o relativamente rápido?

12-65 ¿Qué es un diagrama TTT?

12-66 Trace y marque claramente las diferentes partes de un diagrama TTT para un acero al carbono simple con 0.77% de carbono.

12-67 En el diagrama TTT, ¿cuál es la diferencia entre las fases γ y γ_u ?

12-68 ¿Cómo es que la bainita y la perlita no aparecen en el diagrama del $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$? ¿Éstas son fases o microconstituyentes?

12-69 ¿Por qué razón no se puede hacer uso de los diagramas TTT para describir configuraciones de tratamiento térmico, en las que las muestras son enfriadas en un determinado tiempo (es decir, por qué los diagramas TTT son apropiados sólo para transformaciones isotérmicas)?

12-70 ¿Qué es la bainita? ¿Por qué los aceros que contienen bainita exhiben niveles más altos de tenacidad?

12-71 Se encuentra que un acero eutectoide isotérmicamente transformado tiene una resistencia a la fluencia de 410 MPa. Estime

- la temperatura de transformación y
- la separación entre láminas en la perlita.

12-72 Determine la temperatura de transformación requerida y el microconstituyente, si un acero eutectoide ha de tener los siguientes valores de dureza:

- DRC 38
- DRC 42
- DRC 48
- DRC 52

12-73 Describa la dureza y la microestructura de un acero eutectoide que ha sido calentado a 800 °C durante 1 hora, templado a 350 °C y mantenido así durante 750 s, y finalmente templado a temperatura ambiente.

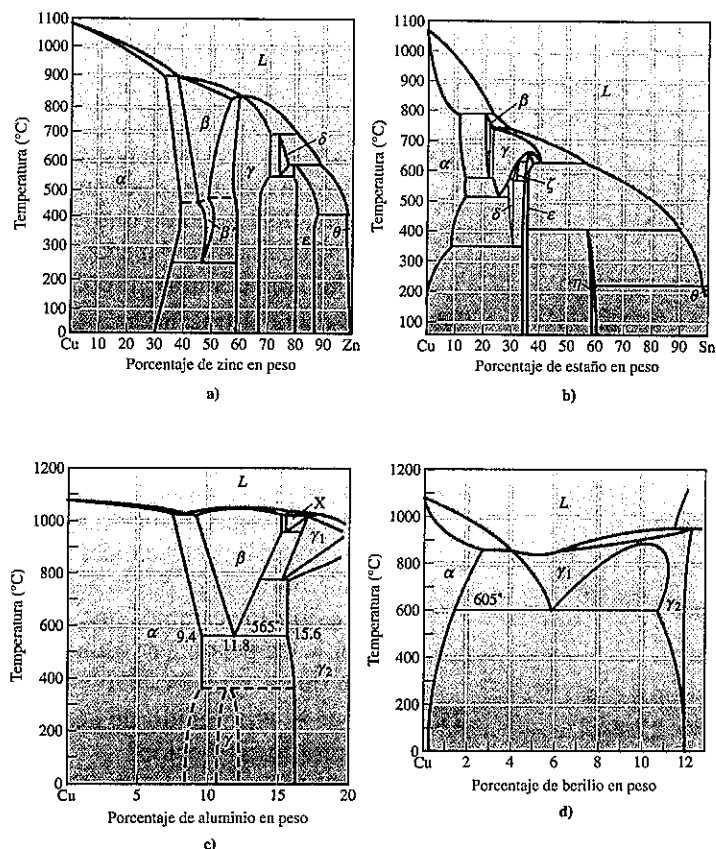


Figura 12-33 Diagramas binarios de fases para los sistemas de a) cobre-zinc, b) cobre-estaño, c) cobre-aluminio y d) cobre berilio (para los problemas 12-23 y 12-61).

- 12-74** Describa la dureza y la microestructura de un acero eutectoide que ha sido calentado a 800 °C, templado a 650 °C, mantenido así durante 500 s y finalmente templado a temperatura ambiente.
- 12-75** Describa la dureza y la microestructura de un acero eutectoide que ha sido calentado a 800 °C, templado a 300 °C y mantenido así durante 10 s y finalmente templado a temperatura ambiente.
- 12-76** Describa la dureza y la microestructura de un acero eutectoide que ha sido calentado a 800 °C, templado a 300 °C y mantenido así durante 10 s, templado a temperatura ambiente y luego recalentado a 400 °C antes de ser finalmente enfriado a temperatura ambiente otra vez.

Sección 12-11 La reacción martensítica y el revenido

- 12-77** ¿Cuál es la diferencia entre transformaciones de fase de estado sólido tales como la reac-

ción eutectoide y la transformación de fase martensítica?

- 12-78** ¿Cuál es la diferencia entre transformaciones isotérmicas y atérmicas?
- 12-79** ¿Qué paso controla la rapidez de transformaciones de fase martensítica?
- 12-80** ¿Por qué la martensita no aparece en el diagrama de fases de Fe-Fe₃C (figura 12-34)?
- 12-81** ¿La martensita en aceros tiene una composición fija? ¿De qué dependen las propiedades de la martensita?
- 12-82** ¿Pueden ocurrir transformaciones de fase martensítica en otras aleaciones y cerámicas?
- 12-83** Compare las propiedades mecánicas de la martensita, perlita y bainita formadas a partir de una composición de acero eutectoide.
- 12-84** Un acero que contiene 0.3% C es calentado a varias temperaturas arriba de la temperatura eutectoide, mantenido así durante 1 hora

y luego templado a temperatura ambiente. Usando la figura 12-34, determine la cantidad, la composición y la dureza de cualquier martensita que se forme cuando la temperatura de calentamiento sea

- a) 728 °C b) 750 °C
c) 790 °C d) 850 °C

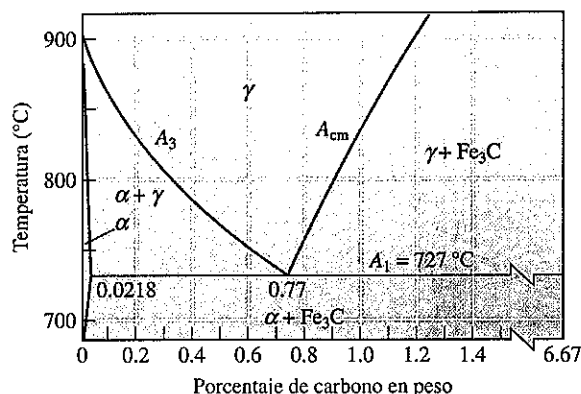


Figura 12-34 La parte eutectoide del diagrama de fases del Fe-Fe₃C (para problemas 12-80, 12-84, 12-85, 12-86 y 12-87).

12-85 Un acero que contiene 0.95% C es calentado a varias temperaturas arriba de la temperatura eutectoide, mantenido así durante 1 hora y luego templado a temperatura ambiente. Usando la figura 12-34, determine la cantidad y la composición de cualquier martensita que se forme cuando la temperatura de calentamiento sea

- a) 728 °C b) 750 °C
c) 780 °C d) 850 °C

12-86 Una microestructura de acero contiene 75% de martensita y 25% de ferrita; la composición de la martensita es de 0.6 % C. Usando la figura 12-34, determine

- a) la temperatura desde la que se templó el acero y
b) el contenido de carbono del acero.

12-87 Una microestructura de acero contiene 92% de martensita y 8% de Fe₃C; la composición de la martensita es de 1.10% C. Usando la figura 12-34, determine

- a) la temperatura desde la que se templó el acero y
b) el contenido de carbono del acero.

12-88 Un acero que contiene 0.8% C es templado para producir sólo martensita. Estime el

cambio de volumen que ocurre, suponiendo que el parámetro de red de la austenita es de 3.6 Å. ¿El acero se expande o se contrae durante el templado?

12-89 Describa el tratamiento térmico completo necesario para producir un acero eutectoide templado y revenido que tenga una resistencia a la tensión de al menos 125 000 psi. Incluya las temperaturas apropiadas.

12-90 Describa el tratamiento térmico completo necesario para producir un acero eutectoide templado y revenido que tenga una dureza DRC de menos de 50. Incluya las temperaturas apropiadas.

12-91 En aleaciones eutécticas, el microconstituyente eutéctico es generalmente el continuo, pero, en las estructuras eutécticas, el microconstituyente primario es por lo general continuo. Al describir los cambios que ocurren al disminuir la temperatura en cada reacción, explique por qué se espera esta diferencia.

12-92 ¿Qué es el revenido de aceros? ¿Por qué es necesario el revenido?

12-93 ¿Qué fases son formadas por la descomposición de la martensita?

12-94 ¿Qué es una martensita revenida?

12-95 Si el revenido resulta en la descomposición de la martensita, ¿por qué se debe formar martensita en primer lugar?

12-96 Describa los cambios en las propiedades que ocurren al revenir un acero eutectoide.

Sección 12-12 Las aleaciones con memoria de forma [AMF]

12-97 ¿Cuál es el principio por el cual las aleaciones con memoria de forma presentan un efecto de memoria?

12-98 Dé ejemplos de materiales que presenten un efecto de memoria de forma.

12-99 ¿Cuáles son algunas de las aplicaciones de aleaciones con memoria de forma?

Problemas de diseño

12-100 Usted desea unir láminas de aluminio a la estructura del piso 24 de un rascacielos, y piensa usar remaches hechos de un aluminio que se pueden endurecer por envejecimiento, pero los remaches deben ser blandos

y dúctiles para lograr una unión apretada. Después de unir las láminas, los remaches deben ser muy fuertes. Diseñe un método para producir, usar y reforzar los remaches.

- 12-101** Diseñe un proceso para producir un polímero de polipropileno con una estructura que sea 75% cristalina. La figura 12-30 proporcionará datos apropiados.

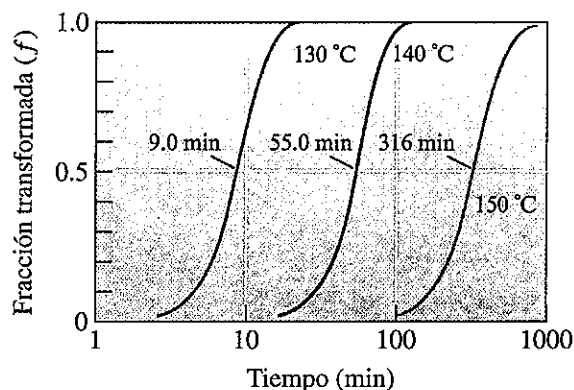


Figura 12-30 Efecto de la temperatura en la cristalización del polipropileno. (Repetida para el problema 12-101.)

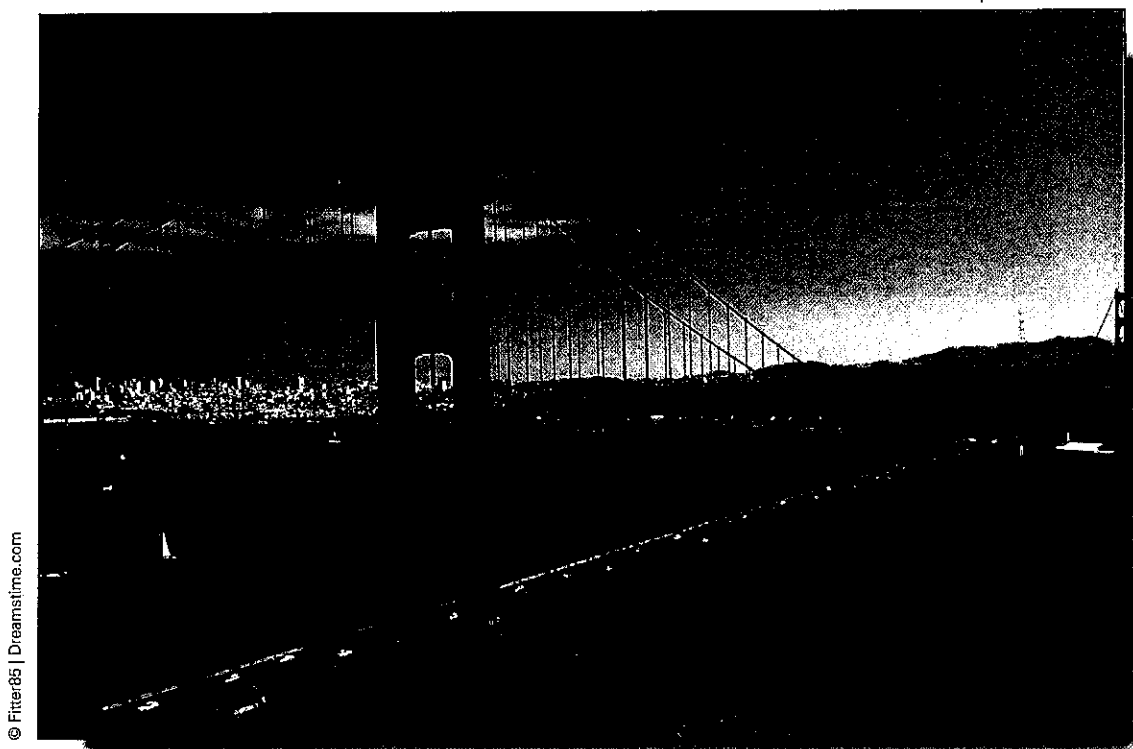
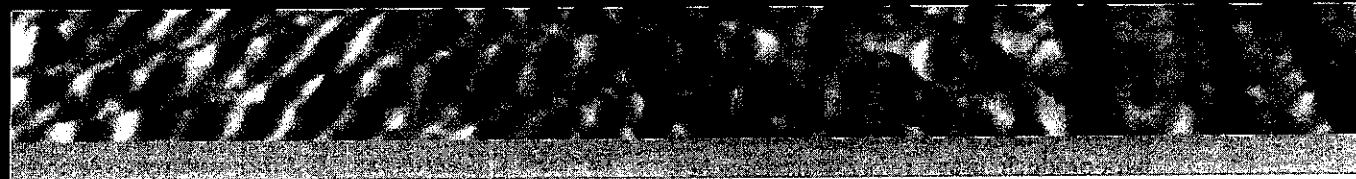
- 12-102** Se utiliza una ménsula de Al-Cu endurecida por envejecimiento para soportar un dispositivo pesado de detección eléctrica fuera de un horno para fabricación de acero. Las temperaturas pueden rebasar los 200 °C. ¿Es éste un buen diseño? Explique. Si no lo es, diseñe una ménsula apropiada y explique por qué su selección es aceptable.
- 12-103** Usted usa un proceso de soldadura por arco para unir un acero eutectoide. Las magnitudes de la rapidez de enfriamiento pueden ser muy altas después del proceso de unión. Describa qué es lo que pasa en el área de la soldadura afectada por el calor y discuta los problemas que pudieran ocurrir. Diseñe un proceso de unión que reduzca al mínimo estos problemas.

Problemas de cómputo

- 12-104** *Cálculo de fases y microconstituyentes en aceros al carbono simples* Escriba un programa de computadora que calcule las cantidades de fases, en aceros al carbono simples, en composiciones que vayan de 0 a 1.5% de carbono. Suponga temperatura ambiente para sus cálculos. El programa debe pedir al usuario que dé un valor para la concentración de carbono. El programa debe hacer uso de este dato y dar la cantidad de fases (ferrita, Fe_3C) en el acero usando la regla de la palanca (de modo semejante al ejemplo 12-6). El programa debe también indicar al usuario (como parte de la salida) si el acero es eutectoide, hipoeutectoide o hipereutectoide. Dependiendo de la composición, el programa también debe hacer disponibles las cantidades de microconstituyentes presentes (es decir, cuánta perlita). El programa también debe imprimir un mensaje descriptivo apropiado que describa la microestructura esperada (suponga enfriamiento lento). Por ejemplo, si la composición escogida es la de acero hipoeutectoide, el programa debe generar un mensaje que indique que la microestructura estará formada principalmente por granos α y perlita.

Knovel® Problemas

- K12-1** ¿Cuáles son los efectos de los ciclos térmicos en aleaciones de NiTi con memoria de forma (AMF)?
- K12-2** Algunas superaleaciones de hierro endurecidas por precipitación se usan para servicio a altas temperaturas. Describa procedimientos de tratamiento térmico empleados para estos aceros.



© Fiter85 | Dreamstime.com

Los aceros constituyen la familia de materiales de más uso para aplicaciones estructurales y de soporte de cargas. Casi todos los edificios, puentes, herramientas, automóviles y otras muchas aplicaciones usan aleaciones ferrosas. Con una variedad de tratamientos térmicos que pueden dar un gran surtido de microestructuras y propiedades, los aceros son probablemente la familia más versátil de materiales de ingeniería.

El puente Golden Gate en California está hecho de acero, el cual está pintado para aumentar su resistencia a la corrosión. (El color se conoce como Naranja Internacional.) Cada uno de los cables principales que sostienen el puente sobre la bahía de San Francisco contiene 27 572 alambres lo que da una longitud total de aproximadamente 129 000 km.

Tratamiento térmico de aceros y hierros colados

¿Se ha preguntado alguna vez?

- ¿Cuál es el material de ingeniería de más amplio uso?
- ¿Qué hace que el acero inoxidable sea "inoxidable"?
- ¿Cuál es la diferencia entre hierro colado y acero?
- ¿Si los aceros inoxidables son ferromagnéticos?

Las aleaciones ferrosas, que se basan en aleaciones de hierro y carbono, incluyen aceros al bajo carbono, aleaciones y aceros para herramienta, aceros inoxidables y hierros colados. Éstos son los materiales de más amplio uso en el mundo. En la historia de la civilización, estos materiales dejaron su huella al definir la *Era del Hierro*. Por lo general, los aceros se producen de dos formas: refinando mineral de hierro o reciclando chatarra de acero.

En la producción de acero primario, el mineral de hierro (procesado para contener de 50 a 70% de óxido de hierro, Fe_2O_3 o Fe_3O_4) se calienta en un alto horno en presencia de coque (una forma de carbono) y oxígeno. El coque reduce el óxido de hierro en un hierro fundido crudo conocido como **metal caliente** o **arrabio**. A unos $\sim 1600^\circ\text{C}$, este material contiene alrededor de 95% de hierro; 4% de carbono; 0.3 a 0.9% de silicio; 0.5% de manganeso, y 0.025 a 0.05% de azufre, fósforo y titanio. La escoria es un subproducto derivado del proceso del alto horno. Contiene sílice (dióxido de silicio), CaO y otras impurezas en forma de un silicato fundido.

Como el arrabio líquido contiene una gran cantidad de carbono, se le sopla oxígeno en el horno de oxígeno básico para eliminar el exceso de carbono y producir acero líquido. El acero tiene un contenido de carbono hasta un máximo de $\sim 2\%$ en peso. En el segundo método, la chatarra se funde a veces en un **horno de arco eléc-**

trico en el que el calor del arco funde la chatarra. Muchos aceros de aleación y especiales, por ejemplo el acero inoxidable, se producen usando fundición eléctrica. Es frecuente que los aceros fundidos (incluyendo los aceros inoxidables) sean sometidos a ulteriores refinamientos. El objetivo es reducir los niveles de impurezas como fósforo, azufre, etc. y llevar el carbono a un nivel deseado.

El acero fundido se vierte en moldes a fin de producir piezas fundidas de acero acabadas o se vacía en formas que después son procesadas por medio de técnicas para dar forma a metales, por ejemplo el laminado o el forjado. En este último caso, el acero se vacía en moldes grandes de lingotes o se vacía continuamente en formas regulares.

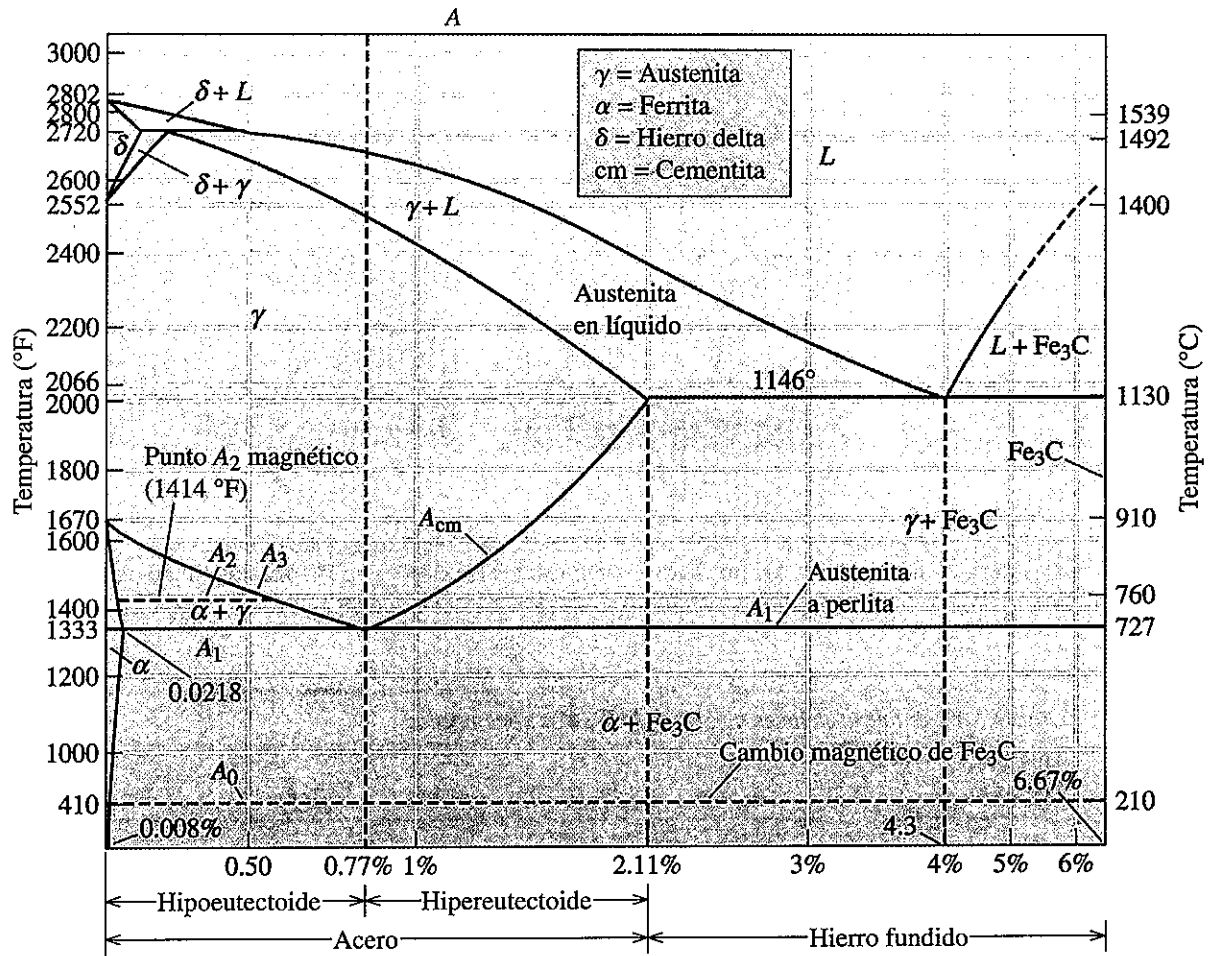
Todos los mecanismos de endurecimiento estudiados en el capítulo previo se aplican en al menos algunas de las aleaciones ferrosas. En este capítulo se estudiará cómo usar la reacción eutectoide para controlar la estructura y propiedades de aceros mediante tratamiento térmico y aleación. También se examina dos clases especiales de aleaciones ferrosas: aceros inoxidables y hierros colados.

13-1 Designaciones y clasificación de aceros

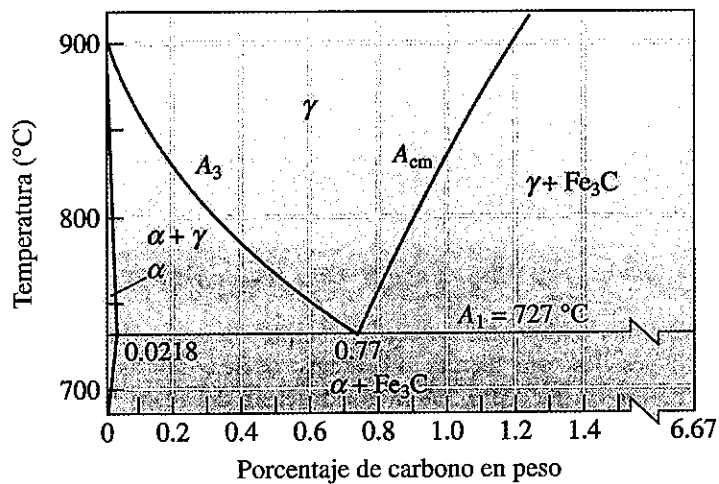
El punto de cambio entre “aceros” y “hierros fundidos” es 2.11% de C, donde la reacción eutéctica es posible. Para aceros, el énfasis está en la parte eutectoide del diagrama (figura 13-1) en la que las líneas de solubilidad y la isoterma eutectoide están especialmente identificadas. La A_3 muestra la temperatura a la que la ferrita empieza a formarse al enfriarse; la A_{cm} indica la temperatura a la que empieza a formarse la cementita, y la A_1 es la temperatura eutectoide.

Casi todos los tratamientos térmicos del acero están dirigidos hacia producir la mezcla de ferrita y cementita que da la combinación correcta de propiedades. La figura 13-2 muestra los tres microconstituyentes importantes, o distribuciones de ferrita y cementita, que por lo general se buscan. La perlita es un microconstituyente formado por una mezcla laminar de ferrita y cementita. En la bainita, que se obtiene por transformación de austenita en un subenfriamiento grande, la cementita está más redondeada que en la perlita. La martensita revenida, una mezcla de cementita muy fina y casi redondeada en ferrita, se forma cuando la martensita se recalienta después de su formación.

Designaciones El AISI (American Iron and Steel Institute) y la SAE (Society of Automotive Engineers) proporcionan sistemas de designaciones (tabla 13-1) que usan un número de cuatro o cinco dígitos. Los primeros dos números se refieren a los principales elementos de aleación presentes, y los últimos dos o tres números se refieren al porcentaje de carbono. Un acero AISI 1040 es un acero al bajo carbono con 0.40% de C. Un acero SAE 10120 es un acero al bajo carbono que contiene 1.20% de C. Un acero AISI 4340 es un acero de aleación que contiene 0.40% de C. Hay que mencionar que la American Society for Testing of Materials (ASTM) tiene una forma diferente de clasificar aceros. La ASTM tiene una lista de especificaciones que describe aceros apropiados para distintas aplicaciones. El ejemplo que sigue ilustra el uso de números AISI.



a)



b)

Figura 13-1 a) Diagrama de fases de Fe- Fe_3C . b) Versión expandida de la parte eutectoide del diagrama Fe- Fe_3C , adaptada de varias fuentes.

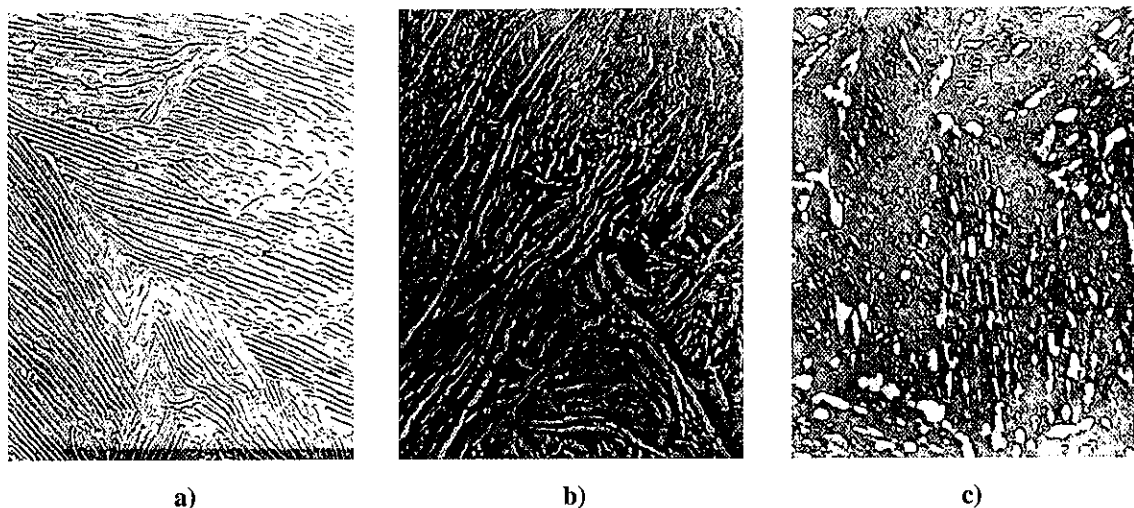


Figura 13-2 Micrografías de a) perlita, b) bainita y c) martensita revenida, que ilustran las diferencias en el tamaño y forma de la cementita entre los tres microconstituyentes (7500X). (De The Making, Shaping and Treating of Steel, 10a. ed. Cortesía de the Association of Iron and Steel Engineers.)

TABLA 13-1 ■ Composiciones de aceros AISI-SAE seleccionados

Número AISI-SAE	% C	% Mn	% Si	% Ni	% Cr	Otros
1020	0.18-0.23	0.30-0.60				
1040	0.37-0.44	0.60-0.90				
1060	0.55-0.65	0.60-0.90				
1080	0.75-0.88	0.60-0.90				
1095	0.90-1.03	0.30-0.50				
1140	0.37-0.44	0.70-1.00				0.08-0.13% S
4140	0.38-0.43	0.75-1.00	0.15-0.30		0.80-1.10	0.15-0.25% Mo
4340	0.38-0.43	0.60-0.80	0.15-0.30	1.65-2.00	0.70-0.90	0.20-0.300% Mo
4620	0.17-0.22	0.45-0.65	0.15-0.30	1.65-2.00		0.20-0.30% Mo
52100	0.98-1.10	0.25-0.45	0.15-0.30		1.30-1.60	
8620	0.18-0.23	0.70-0.90	0.15-0.30	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25% Y
9260	0.56-0.64	0.75-1.00	1.80-2.20			

Ejemplo 13-1

Diseñe un método para determinar el número AISI

Se ha encontrado que una herramienta de acero no aleado, empleada para maquinari- nes de aluminio para automóviles, funciona bien pero los registros de compras se han perdido y usted no sabe la composición del acero. La microestructura del acero es mar- tensita revenida. Suponga que usted no puede estimar la composición del acero a partir de la estructura. Diseñe un tratamiento que pueda ayudar a determinar el contenido de carbono del acero.

SOLUCIÓN

Suponga que no hay acceso a equipo que nos permitiría analizar directamente la compo- sición química. Como toda la estructura del acero es una martensita revenida muy fina,

es posible hacer un sencillo tratamiento térmico para producir una estructura que pueda ser analizada más fácilmente. Esto puede hacerse en dos formas diferentes.

La primera es calentar el acero a una temperatura apenas abajo de la temperatura A_1 y mantenerla durante largo tiempo. El acero se sobrerreviene y se forman esferas grandes de Fe_3C en una matriz de ferrita. Entonces se puede estimar la cantidad de ferrita y cementita y calcular el contenido de carbono usando la ley de la palanca. Si se mide 16% de Fe_3C usando este método, el contenido de carbono es

$$\% \text{Fe}_3\text{C} = \left[\frac{(x - 0.0218)}{(6.67 - 0.0218)} \right] \times 100 = 16 \quad \text{o} \quad x = 1.086\% \text{ C}$$

Un método mejor, sin embargo, es calentar el acero arriba de la A_{cm} para producir sólo la austenita. Si el acero se enfría entonces lentamente, se transforma en perlita y en un microconstituyente primario. Si, cuando se haga esto, se estima que la estructura contiene 95% de perlita y 5% de Fe_3C primario, entonces

$$\% \text{Perlita} = \left[\frac{(6.67 - x)}{(6.67 - 0.77)} \right] \times 100 = 95 \quad \text{o} \quad x = 1.065\% \text{ C}$$

El contenido de carbono es del orden de 1.065 a 1.086%, consistente con un acero 10110. En este procedimiento, se supone que los porcentajes en peso y volumen de los microconstituyentes son iguales, lo cual es muy aproximadamente el caso en aceros.

Clasificaciones Los aceros se pueden clasificar con base en su composición o en la forma en que han sido procesados. Los aceros al carbono contienen hasta ~2% de carbono. Estos aceros pueden también contener otros elementos, por ejemplo Si (máximo 0.6%), Cu (hasta 0.6%) y Mn (hasta 1.65%). Los aceros descarbonizados contienen menos de 0.005% de C. Los aceros al carbono ultrabajo contienen un máximo de 0.03% de carbono. También contienen muy bajos niveles de otros elementos como Si y Mn. Los aceros al bajo carbono contienen 0.04 a 0.15% de carbono. Estos aceros al bajo carbono se emplean para hacer carrocerías de automóviles y cientos de otras aplicaciones. El acero dulce contiene 0.15 a 0.3% de carbono. Este acero se usa en edificios, puentes, tuberías, etc. Los aceros al medio carbono contienen 0.3 al 0.6% de carbono y se usan para hacer maquinaria, tractores, equipo de minería, etc. Los aceros al alto carbono contienen arriba de 0.6% de carbono y se usan para hacer resortes, ruedas para carros de ferrocarril y otros objetos semejantes. Nótese que los hierros colados son aleaciones de Fe-C que contienen de 2 a 4% de carbono.

Los aceros aleados son composiciones que contienen niveles más altos de elementos de aleación. Más adelante en este capítulo se examinará el efecto de los elementos de aleación, los cuales mejoran la capacidad de los aceros para ser endurecidos. El AISI define los aceros aleados como aceros que exceden uno o más de los siguientes límites de composición: $\geq 1.65\%$ de Mn, 0.6% de Si o 0.6% de Cu. El contenido total de carbono es hasta de 1% y el contenido total del elemento de aleaciones está por debajo de 5%. Un material es también un acero aleado si se especifica una concentración definida de elementos de aleación como Ni, Cr, Mo, Ti, etc. Estos aceros se usan para hacer herramientas (martillos, cinces, etc.) y también para construir piezas como ejes, flechas y engranajes.

Ciertos aceros de calidad especial pueden contener niveles más altos de azufre ($>0.1\%$) o plomo (~ 0.15 a 0.35%) para facilitar su maquinado. Estos aceros, sin embargo, no pueden soldarse con facilidad. Recientemente, investigadores han ideado un "acero verde" en el que el plomo, una toxina ambiental, es sustituido con estaño (Sn) y/o antimonio (Sb).

Los aceros también pueden ser clasificados con base en su procesamiento. Por ejemplo, el término “aceros obtenidos por colada continua” se refiere a aceros colados continuamente. Los aceros galvanizados tienen un recubrimiento de zinc para resistir la corrosión (capítulo 23). Del mismo modo, el acero con recubrimiento de estaño se utiliza para hacer latas y otros productos resistentes a la corrosión. El estaño se deposita usando galvanoplastia, procedimiento conocido como “electrodeposición de recubrimiento continuo”. Los “aceros E” son aceros que se funden usando un horno eléctrico, mientras que los “aceros B” contienen una concentración pequeña pero significativa de boro (0.0005 a 0.003%). Recientemente, se ha perfeccionado un acero inoxidable con recubrimiento “resistente a gérmenes”.

13-2 Tratamientos térmicos simples

Por lo general se usan cuatro tratamientos térmicos simples para aceros: recocido de proceso, recocido, normalización y esferoidización (figura 13-3). Estos tratamientos térmicos se emplean para lograr uno de tres propósitos: 1) eliminar los efectos del trabajo en frío, 2) controlar el endurecimiento por dispersión o 3) mejorar la maquinabilidad.

Recocido de proceso; eliminación del trabajo en frío El tratamiento térmico de recristalización empleado para eliminar el efecto del trabajo en frío, en aceros con menos de alrededor de 0.25% de C, recibe el nombre de **recocido de proceso**. Este tratamiento se hace de 80 a 170 °C por debajo de la temperatura A_1 . La intención del tratamiento de recocido de proceso para aceros es similar al recocido de vidrios inorgánicos, en el que la idea principal es reducir de manera importante o eliminar los esfuerzos residuales.

Recocido y normalización; endurecimiento por dispersión Los aceros pueden ser endurecidos por dispersión al controlar la finura de su perlita. El acero inicialmente se calienta para producir austenita homogénea (fase γ CCCa), paso llamado **austenitización**. El **recocido**, o recocido completo, permite que el acero se enfríe lentamente en un horno, produciendo perlita gruesa. La **normalización** permite que el acero se enfríe con más rapidez, el aire, produciendo perlita fina. La figura 13-4 presenta las propiedades comunes obtenidas al recocer y normalizar aceros al bajo carbono.

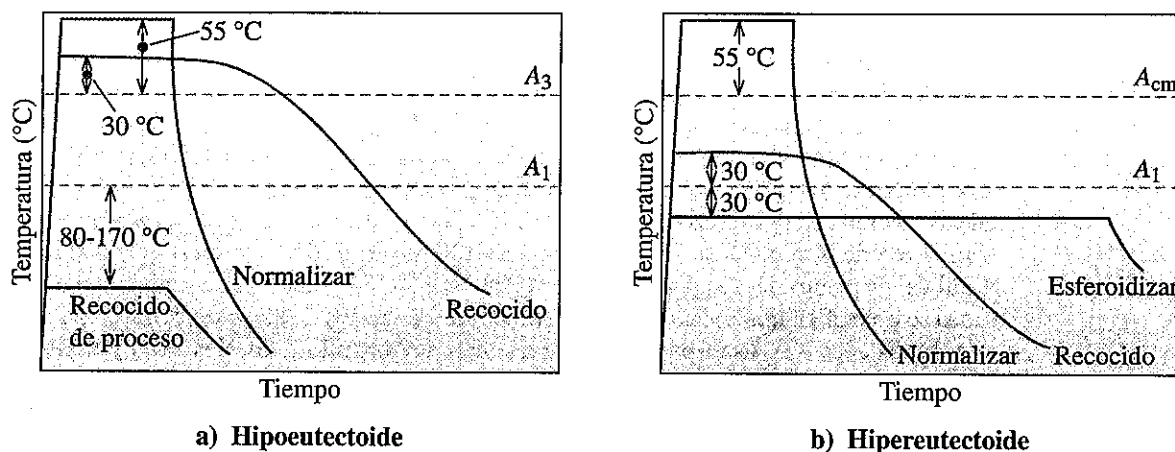


Figura 13-3 Resumen esquemático de los tratamientos térmicos simples para a) aceros hipoeutectoides y b) aceros hipereutectoides.

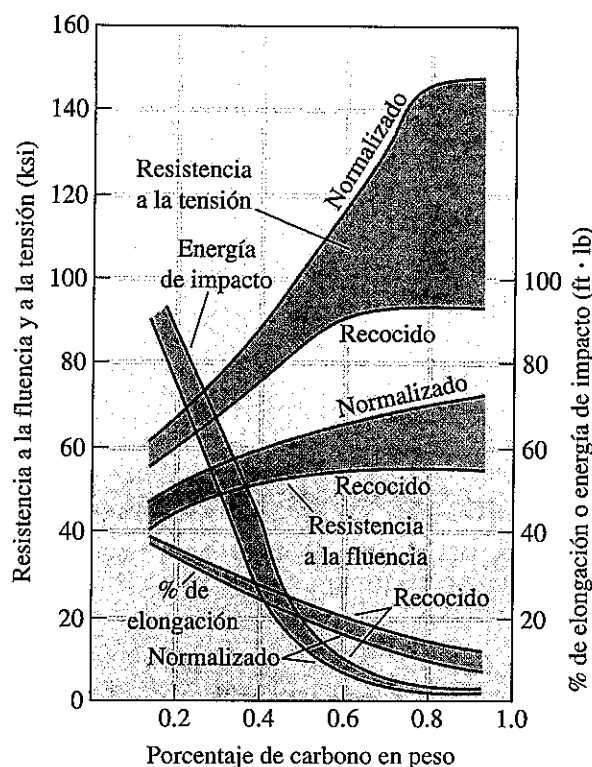


Figura 13-4
Efecto del carbono y del tratamiento térmico en las propiedades de aceros al bajo carbono.

Para el recocido, la austenitización de aceros hipoeutectoides se realiza a unos 30 °C arriba de la temperatura A_3 , produciendo 100% γ ; pero, la austenitización de un acero hipereutectoide se hace a unos 30 °C arriba de la A_1 , produciendo austenita y Fe_3C . Este proceso evita la formación de una película continua y frágil de Fe_3C en los límites de granos que ocurre en enfriamiento lento a partir de la región 100% γ . En ambos casos, el lento enfriamiento en un horno y la perlita gruesa dan una resistencia relativamente baja y buena ductilidad.

Para la normalización, la austenitización se hace a unos 55 °C arriba de A_3 o A_{cm} ; el acero se remueve entonces del horno y se enfría al aire. El enfriamiento más rápido da perlita fina y produce una resistencia más alta.

Esferoidización; mejora de la maquinabilidad Los aceros que contienen una gran concentración de Fe_3C tienen malas características de maquinabilidad. Es posible transformar la morfología del Fe_3C mediante la *esferoidización*. Durante este tratamiento, que requiere varias horas a unos 30 °C por debajo de A_1 , cambia la morfología de la fase Fe_3C a partículas esféricas grandes para reducir el área de límite. La microestructura, conocida como **esferoidita**, tiene una matriz continua de ferrita suave, que se puede maquinar (figura 13-5). Después del maquinado, el acero recibe un tratamiento térmico más refinado para obtener las propiedades requeridas. Una microestructura similar ocurre cuando se reviene martensita un poco por debajo de A_1 durante largos periodos. Como ya se dijo antes, elementos de aleación como el Pb y S se agregan también para mejorar las características de maquinado de aceros y, en tiempos más recientes, se han inventado “aceros verdes” sin plomo que tienen muy buenas características de maquinado.

El siguiente ejemplo muestra cómo pueden desarrollarse condiciones diferentes de tratamiento térmico para una composición determinada de acero.

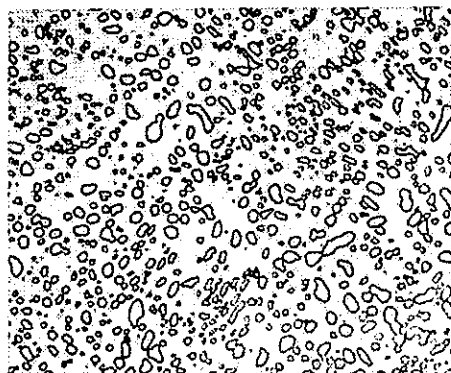


Figura 13-5

Microestructura de esferoidita con partículas de Fe_3C dispersas en una matriz de ferrita (850 $\times$). (De ASM Handbook, vol. 7 (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.)

Ejemplo 13-2**Determinación de temperaturas para tratamiento térmico**

Temperaturas recomendadas para el recocido de proceso, recocido, normalización y esferoidización de aceros 1020, 1077 y 10120.

SOLUCIÓN

En la figura 13-1 se determinan las temperaturas críticas A_1 , A_3 o A_{cm} para cada uno de los aceros. Es posible entonces especificar el tratamiento térmico basado en estas temperaturas.

Tipo de acero	1020	1077	10120
Temperaturas críticas	$A_1 = 727^\circ\text{C}$ $A_3 = 830^\circ\text{C}$	$A_1 = 727^\circ\text{C}$	$A_1 = 727^\circ\text{C}$ $A_{cm} = 895^\circ\text{C}$
Recocido de proceso	727 – (80 a 170) = 557 a 647 $^\circ\text{C}$	No se realiza	No se realiza
Recocido	$830 + 30 = 860^\circ\text{C}$	$727 + 30 = 757^\circ\text{C}$	$727 + 30 = 757^\circ\text{C}$
Normalización	$830 + 55 = 885^\circ\text{C}$	$727 + 55 = 782^\circ\text{C}$	$895 + 55 = 950^\circ\text{C}$
Esferoidización	No se realiza	$727 - 30 = 697^\circ\text{C}$	$727 - 30 = 697^\circ\text{C}$

13-3 Tratamientos térmicos isotérmicos

El efecto de la temperatura de transformación en las propiedades de un acero 1080 (eutectoide) se estudió en el capítulo 12. Cuando disminuye la temperatura de transformación isotérmica, la perlita se hace cada vez más fina antes que la bainita empiece a formarse. A temperaturas muy bajas, se obtiene martensita.

Revenido en la fase austenítica y recocido isotérmico

El tratamiento térmico de transformación isotérmica empleado para producir bainita, llamado **revenido en la fase austenítica**, simplemente involucra austenitizar el acero, templando a alguna temperatura por debajo de la nariz de la curva TTT, y manteniendo a esa temperatura hasta que toda la austenita se transforme en bainita (figura 13-6).

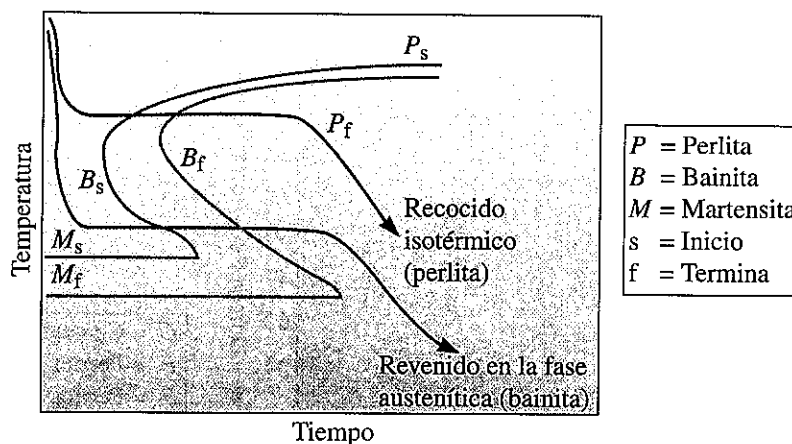


Figura 13-6 Tratamientos térmicos de revenido en la fase austenítica y recocido isotérmico en un acero 1080.

El recocido y la normalización por lo general se usan para controlar la finura de la perlita; no obstante, la perlita formada por un **recocido isotérmico** (figura 13-6) puede dar propiedades más uniformes, porque las magnitudes de rapidez de enfriamiento y microestructura obtenidas durante el recocido y normalización varían en toda la sección transversal del acero. *Nótese que los diagramas TTT sólo describen tratamientos térmicos (es decir, se supone que la muestra empieza y completa el tratamiento térmico a una temperatura determinada).* Así, no es posible describir exactamente tratamientos térmicos al superponer curvas de enfriamiento en un diagrama TTT como las que se ven en la figura 13-6.

Efecto de los cambios en la concentración de carbono en el diagrama TTT

Ya sea en un acero hipoeutectoide o en uno hipereutectoide, el diagrama TTT debe reflejar la posible formación de una fase primaria. Los diagramas de transformación isotérmica para un acero 1050 y un 10110 se ilustran en la figura 13-7. El cambio más notable es la presencia de una “ala” que empieza en la nariz de la curva y se hace asintótica a la temperatura A_3 o A_{cm} . Esta ala representa el tiempo de inicio de ferrita (F_s) en aceros hipoeutectoides o el tiempo de inicio de la cementita (C_s) en aceros hipereutectoides.

Cuando un acero 1050 se austenitiza, se temple y se mantiene entre A_1 y A_3 , la ferrita primaria forma núcleos y crece. Al final, resultan las cantidades en equilibrio de ferrita y austenita. Del mismo modo, la ferrita primaria forma núcleos y crece hasta alcanzar la cantidad de equilibrio. El resto de la austenita se transforma entonces en perlita. Una situación similar, que produce cementita primaria y perlita, se encuentra para el acero hipereutectoide.

Si un acero 1050 austenitizado se enfría a una temperatura comprendida entre las temperaturas de la nariz y la correspondiente a A_1 , la ferrita primaria de nuevo forma un núcleo y crece hasta alcanzar la cantidad de equilibrio. A continuación, el resto de la austenita se transforma en perlita. Una situación similar, la producción de cementita y perlita, se presenta para el acero hipereutectoide.

Si se temple el acero por debajo de la nariz de la curva, sólo se forma bainita, sin importar cuál sea el contenido de carbono del acero. Si los aceros se templean a temperaturas debajo de la M_s , se formará martensita. El siguiente ejemplo muestra la forma en que el diagrama de fases y el diagrama TTT pueden guiar el desarrollo del tratamiento térmico de aceros.

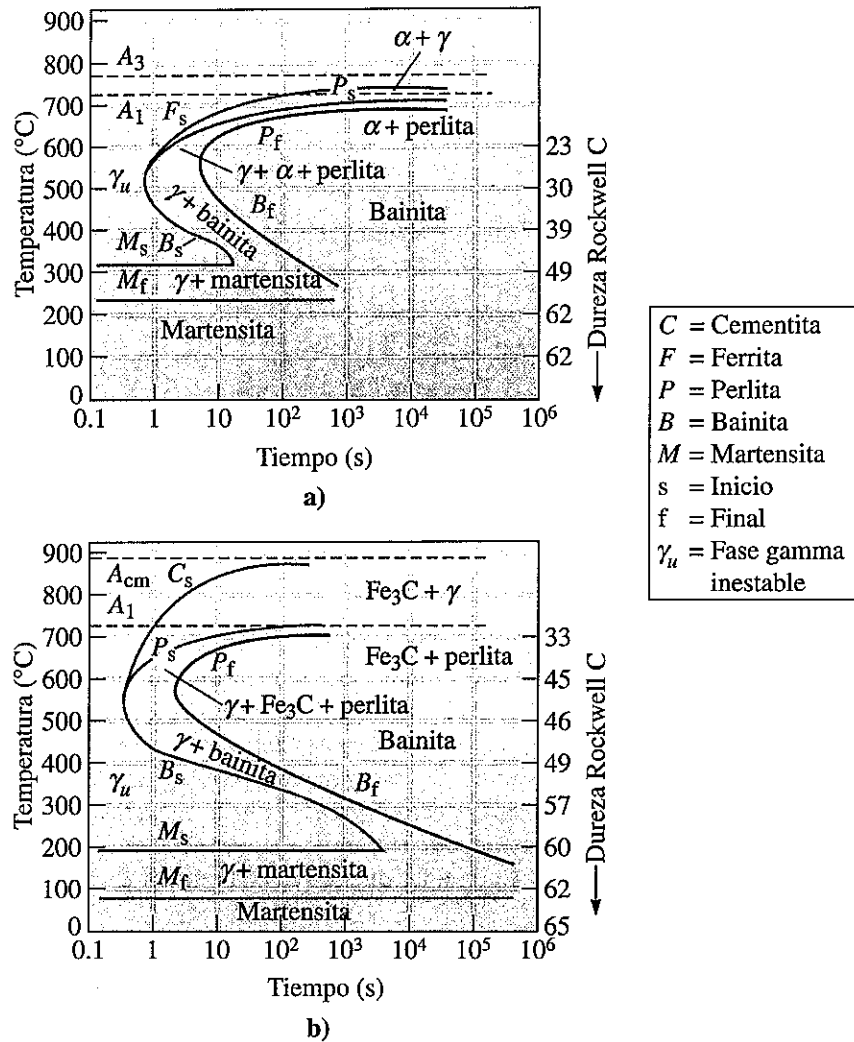


Figura 13-7 Diagramas TTT para a) un acero 1050 y b) un acero 10110. Nótese que γ_u = austenita inestable.

Ejemplo 13-3

Diseño de un tratamiento térmico para un eje

Es necesario un tratamiento térmico para producir una microestructura uniforme y una dureza de DRC 23 en un eje de acero 1050.

SOLUCIÓN

Se podría afrontar esta tarea de varias formas. Se podría austenitizar el acero, luego enfriarlo a una rapidez apropiada por recocido o normalizado para obtener la dureza correcta. No obstante, al hacer esto, se encuentra que la estructura y la dureza varían de la superficie al centro del eje.

Un método mejor es usar un tratamiento térmico isotérmico. En la figura 13-7 se encuentra que se obtiene una dureza de DRC 23 al transformar austenita en una mezcla

de ferrita y perlita a 600 °C. En la figura 13-1 se encuentra que la temperatura A_3 es de 770 °C. Por tanto, el tratamiento térmico es

1. Austenitizar el acero a $770 + (30 \text{ a } 55) = 800 \text{ a } 825$ °C, manteniéndolo así durante 1 hora y obteniendo 100% γ .

2. Templar el acero a 600 °C y manteniéndolo así durante un mínimo de 10 s. La ferrita primaria empieza a precipitarse a partir de la austenita inestable después de alrededor de 1.0 s. Luego de 1.5 s, empieza a crecer perlita y la austenita se transforma por completo en ferrita y perlita después de unos 10 segundos. Posteriormente a este tratamiento, los microconstituyentes presentes son

$$\alpha \text{ primaria} = \left[\frac{(0.77 - 0.5)}{(0.77 - 0.218)} \right] \times 100 = 36\%$$

$$\text{Perlita} = \left[\frac{(0.5 - 0.0218)}{(0.77 - 0.0218)} \right] \times 100 = 64\%$$

3. Enfriar al aire a temperatura ambiente, preservando las cantidades de ferrita primaria y perlita. La microestructura y dureza son uniformes debido al recocido isotérmico.

Interrupción de la transformación isotérmica Se producen microestructuras complicadas al interrumpir un tratamiento térmico isotérmico. Por ejemplo, se podría austenitizar el acero 1050 (figura 13-8) a 800 °C, templar a 650 °C y mantenerlo así durante 10 s (permitiendo que se formen algo de ferrita y de perlita), luego templar a 350 °C y mantenerlo así durante 1 hora (3600 s). Cualquier cantidad de austenita inestable restante antes de templar a 350 °C se transforma en bainita. La estructura final es ferrita, perlita y bainita. El tratamiento se complicaría aún más al interrumpir el tratamiento a 350 °C después de 1 min (60 s) y templar. Cualquier austenita restante después de 1 min a 350 °C forma martensita. La estructura final ahora contiene ferrita, perlita, bainita y martensita. ¡Nótese que cada vez que se cambia la temperatura, se empieza a contar el tiempo desde cero! En la práctica, las temperaturas no se pueden cambiar de manera instantánea (es decir, no es posible pasar instantáneamente de 80 a 650 o de 650 a 350 °C). Ésta es la razón por la cual es mejor usar los diagramas de transformación de enfriamiento continuo (TEC).

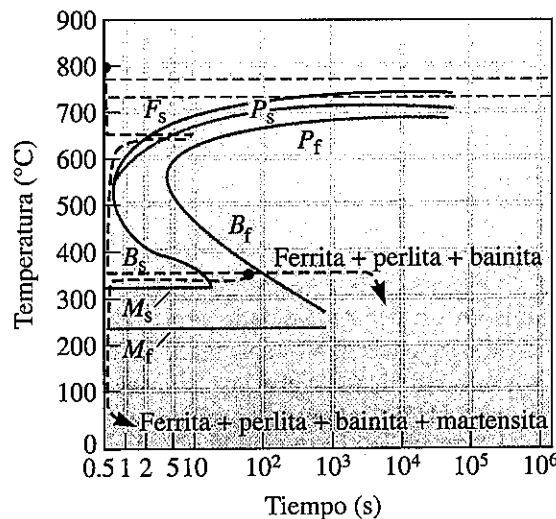


Figura 13-8
Producción de estructuras complicadas al interrumpir el tratamiento térmico isotérmico de un acero 1050.

13-4 Tratamientos térmicos de templado y revenido

El templado endurece casi todos los aceros y el revenido aumenta la tenacidad. Esto se ha sabido quizá durante miles de años. Por ejemplo, una serie de esos tratamientos térmicos se ha utilizado para hacer acero de Damasco y espadas de samurái japonesas. Es posible obtener una dispersión excepcionalmente fina de Fe_3C y ferrita (conocida como martensita revenida) si primero se temple la austenita para producir martensita y luego se reviene. El tratamiento por revenido controla las propiedades finales del acero (figura 13-9). Nótese que esto es diferente de un tratamiento térmico por esferoidización (figura 13-5). El siguiente ejemplo muestra la forma en que una combinación de tratamientos térmicos se emplea para obtener aceros con propiedades deseadas.

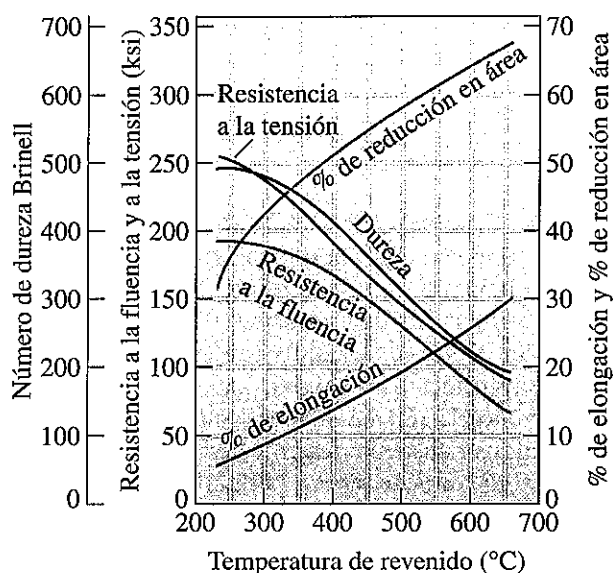


Figura 13-9

Efecto de la temperatura de revenido en las propiedades mecánicas de un acero 1050.

Ejemplo 13-4

Diseño de un tratamiento de templado y revenido

Una flecha giratoria que transmite la energía de un motor eléctrico está hecho de acero 1050. Su resistencia a la fluencia debe ser al menos de 145 000 psi, pero también debe tener al menos 15% de elongación para obtener tenacidad. Diseñe un tratamiento térmico para producir esta pieza.

SOLUCIÓN

No es posible obtener esta combinación de propiedades por recocido o normalización (figura 13-4), pero un tratamiento térmico de templado y revenido produce una microestructura que puede tener tanto resistencia como tenacidad. La figura 13-9 muestra que la resistencia a la fluencia pasa de 145 000 psi si el acero se reviene por debajo de 460 °C, mientras que la elongación excede 15% si el revenido se hace arriba de 425 °C. La temperatura A_3 para el acero es de 770 °C. Un posible tratamiento térmico es

1. Austenitizar arriba de la temperatura A_3 de 770 °C durante 1 hora. Una temperatura apropiada puede ser $770 + 55 = 825$ °C.
2. Templar rápidamente a temperatura ambiente. Como la M_f es de unos 250 °C, se formará martensita.

3. Revenir por calentamiento del acero a 440 °C. Normalmente, 1 hora será suficiente si el acero no es demasiado grueso.
4. Enfriar a temperatura ambiente.

Austenita retenida Hay una gran expansión en volumen cuando se forma martensita a partir de austenita. A medida que se forman placas de martensita durante el templado, las placas rodean y aíslan pequeños depósitos de austenita (figura 13-10), que se deforman para dar espacio a la martensita de menor densidad. Al avanzar la transformación, no obstante, para que se transformen los restantes depósitos de austenita, la martensita circundante debe deformarse. Debido a que la martensita fuerte se resiste a la transformación, la martensita existente se agrieta o permanece atrapada en la estructura como **austenita retenida**. La austenita retenida puede ser un problema serio. La martensita se ablanda y se hace más dúctil durante el revenido. Después del revenido, la austenita retenida se enfría por debajo de las temperaturas M_s y M_f y se transforma en martensita, dado que la **martensita revenida** se puede deformar. ¡Pero ahora el acero tiene un contenido mayor de martensita dura y quebradiza. Es posible que sea necesario un segundo paso de revenido para eliminar la martensita formada de la austenita retenida. La austenita retenida también es más que un problema para los aceros al alto carbono. Las temperaturas de inicio y terminación de la martensita se reducen cuando el contenido de carbono aumenta (figura 13-11). Los aceros al alto carbono deben ser refrigerados para producir sólo la martensita.

Esfuerzos residuales y agrietamiento Los esfuerzos residuales también se producen por el cambio de volumen o por el trabajo en frío. Puede usarse un recocido de alivio de esfuerzos internos, con objeto de remover o reducir al mínimo los esfuerzos residuales debidos al trabajo en frío. Los esfuerzos también son inducidos por la expansión y contracción térmicas. En aceros, hay otro mecanismo más que causa esfuerzos. Cuando los aceros se templan, la superficie del acero templado se enfría rápidamente y se transforma en martensita. Cuando la austenita del centro se transforma después, la superficie dura se somete a tensión en tanto que el centro se comprime. Si los esfuerzos residuales rebasan la resistencia a la fluencia, se forman **grietas por templado** en la superficie (figura 13-12). Para evitar esto, primero se puede enfriar a apenas arriba de M_s y mantener así hasta que la temperatura se iguale en el acero; un templado subsiguiente permite que todo el acero se transforme en martensita más o menos al mismo tiempo. Este tratamiento térmico se deno-



Figura 13-10
Austenita retenida (blanca) atrapada entre agujas de martensita (negra) (1000×). (De ASM Handbook, vol. 8 (1973), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.)

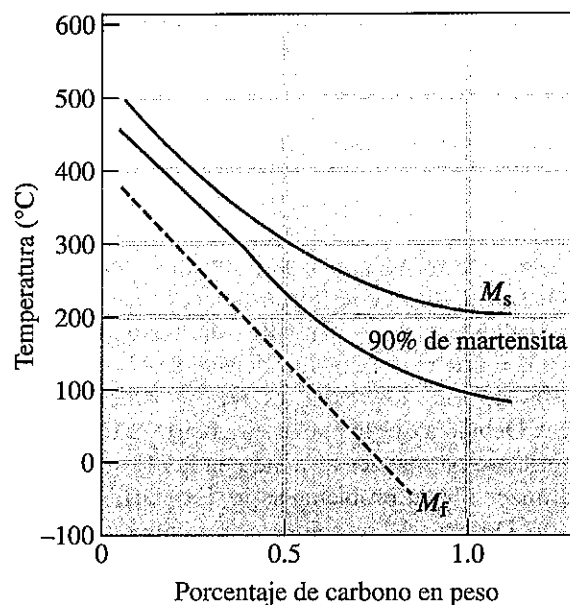


Figura 13-11

Al incrementarse el carbono se reducen las temperaturas M_s y M_f en aceros al bajo carbono.

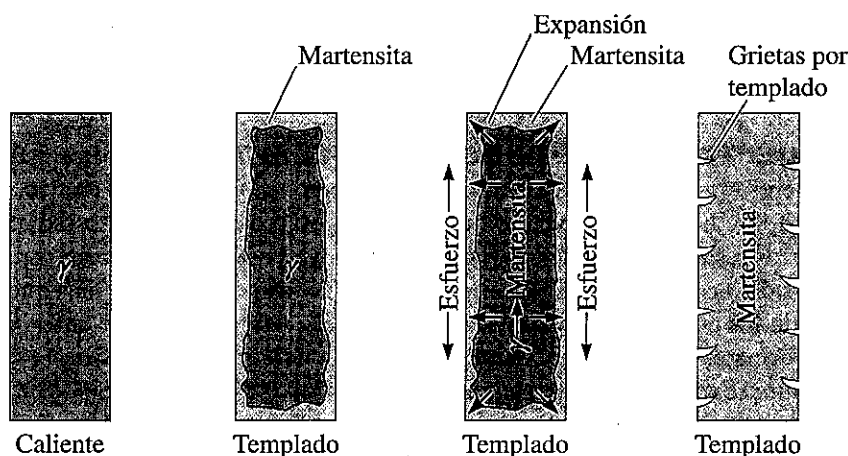


Figura 13-12 Formación de grietas por templado causadas por esfuerzos residuales producidos durante el templado. La figura ilustra el desarrollo de esfuerzos cuando la austenita se transforma en martensita durante el enfriamiento.

mina **templado arriba de M_s** o **temple martensítico ininterrumpido** (figura 13-13). Nótese que como se explica por ahora, hablando estrictamente, los diagramas TEC deben usarse para examinar tratamientos térmicos no isotérmicos.

Rapidez de templado

Se suponía que al usar el diagrama TTT, se podría enfriar instantáneamente de la temperatura de austenitización a la de transformación. Debido a que esto no ocurre en la práctica, pueden formarse microconstituyentes indeseables durante el proceso de templado. Por ejemplo, puede formarse perlita cuando el acero se enfría rebasando la nariz de la curva, en particular porque el tiempo de la nariz es menor a un segundo en aceros al carbono simples.

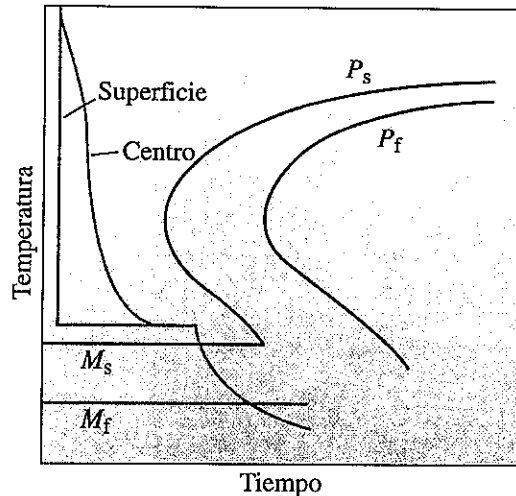


Figura 13-13

Tratamiento térmico de templado arriba de M_s , diseñado para reducir esfuerzos residuales y grietas por templado.

TABLA 13-2 ■ Coeficiente H , o severidad del templado, para varios medios de templado

Medio	Coeficiente H	Rapidez de enfriamiento en el centro de una barra de 1 pulg ($^{\circ}\text{C/s}$)
Aceite (sin agitación)	0.25	18
Aceite (con agitación)	1.0	45
H_2O (sin agitación)	1.0	45
H_2O (con agitación)	4.0	190
Salmuera (sin agitación)	2.0	90
Salmuera (con agitación)	5.0	230

La rapidez a la que el acero se enfría durante el templado depende de varios factores. Primero, la superficie siempre se enfría más rápido que el centro de la pieza. Además, cuando aumenta el tamaño de la pieza, la rapidez de enfriamiento en cualquier parte es más lenta. Por último, la rapidez de enfriamiento depende de la temperatura y de las características de transferencia de calor del medio de templado (tabla 13-2). El templado en aceite, por ejemplo, produce un coeficiente H más bajo, o rapidez de enfriamiento más lenta, que el templado en agua o en salmuera. El coeficiente H es equivalente al coeficiente de transferencia térmica. La agitación ayuda a romper la capa de vapor (por ejemplo, cuando el agua es el medio de templado) y mejora la rapidez total de transferencia térmica al llevar líquido más fresco para hacer contacto con las piezas que se templan.

Diagramas de transformación de enfriamiento continuo

Se puede desarrollar un diagrama de *transformación de enfriamiento continuo* (TEC), si se determinan las microestructuras producidas en el acero a varias magnitudes de rapidez de enfriamiento. En la figura 13-14 se ilustra la curva TEC para un acero 1080. El diagrama TEC difiere del diagrama TTT en que se requieren de tiempos más largos para que se inicien transformaciones y no se observa región de bainita.

Si se enfría un acero 1080 a 5°C/s , el diagrama TEC dice que se obtiene perlita gruesa; el acero se ha recocido. Enfriar a 35°C/s da la perlita fina y es un tratamiento térmico

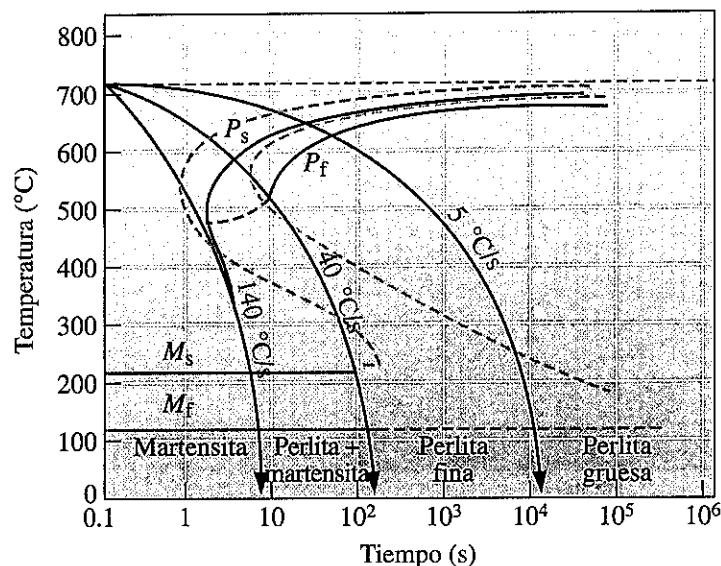


Figura 13-14 Diagrama TEC (líneas continuas) para un acero 1080 comparado con el diagrama TTT (líneas discontinuas).

de normalización. Enfriar a $100\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ permite que se inicie la formación de perlita, pero la reacción es incompleta y la austenita restante cambia a martensita. Se obtiene 100% de martensita y por tanto se puede realizar un tratamiento térmico de templado y revenido, sólo si se enfría más rápido que $140\text{ }^{\circ}\text{C/s}$. Otros aceros, por ejemplo el acero al bajo carbono de la figura 13-15, tienen diagramas TEC más complicados. En varios manuales se puede hallar una compilación de diagramas TTT y TEC para diferentes grados de aceros.

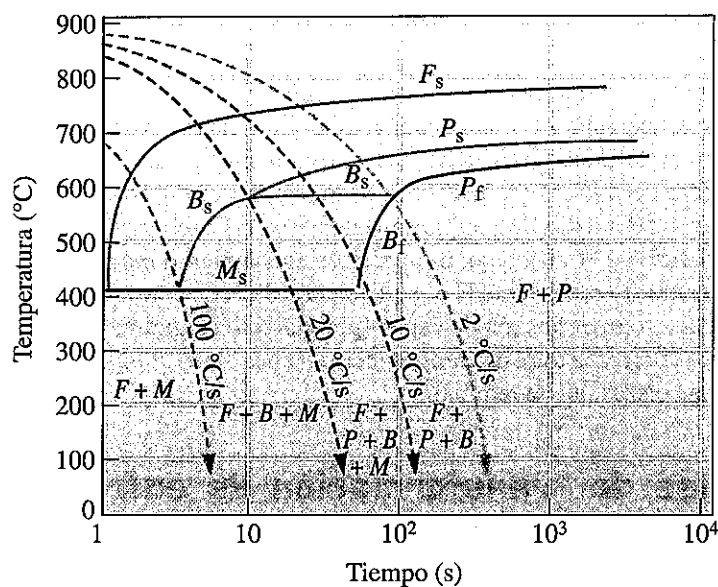


Figura 13-15 Diagrama TEC para un acero de baja aleación, 0.2% de C.

13-5 Efecto de elementos de aleación

Se agregan elementos de aleación a aceros para a) obtener endurecimiento por solución sólida de la ferrita, b) causar la precipitación de carburos de aleación en vez de Fe_3C , c) mejorar la resistencia a la corrosión y otras características especiales del acero y d) mejorar la **templabilidad**. Este último término describe la facilidad con la que los aceros pueden formar martensita, lo cual se relaciona con la facilidad con que se puede formar martensita en una sección gruesa de acero que se temple. Con un acero que se puede endurecer con más facilidad, es posible "salir" con una rapidez de enfriamiento relativamente lenta y aún así formar martensita. Mejorar la templabilidad es muy importante en aceros aleados y aceros para herramienta.

Templabilidad En aceros al bajo carbono, la nariz de las curvas TTT y TEC se presenta en tiempos muy cortos; en consecuencia, se requiere de magnitudes de rapidez de enfriamiento muy rápidas para producir sólo martensita. En secciones delgadas de acero, el templado rápido produce distorsión y grietas; en aceros gruesos, no se puede obtener martensita. Todos los elementos comunes de aleación en acero desplazan los diagramas TTT y TEC a tiempos más largos, lo cual permite obtener sólo martensita incluso en secciones gruesas a magnitudes de rapidez de enfriamiento lentas. La figura 13-16 muestra las curvas TTT y TEC para un acero 4340.

Los aceros al bajo carbono tienen baja templabilidad; sólo magnitudes de rapidez de enfriamiento muy rápido producen sólo martensita. Los aceros de aleación tienen alta templabilidad, incluso enfriando al aire pueden producir martensita. La templabilidad no se refiere a la dureza del acero. Un acero al bajo carbono y de alta aleación puede fácilmente formar martensita pero, debido al bajo contenido de carbono, la martensita no es dura.

Efecto de la estabilidad de fases Cuando se agregan elementos de aleación al acero, se afecta la estabilidad del Fe- Fe_3C binario y el diagrama de fases se altera (figura 13-17). Los elementos de aleación reducen el contenido de carbono al cual ocurre la

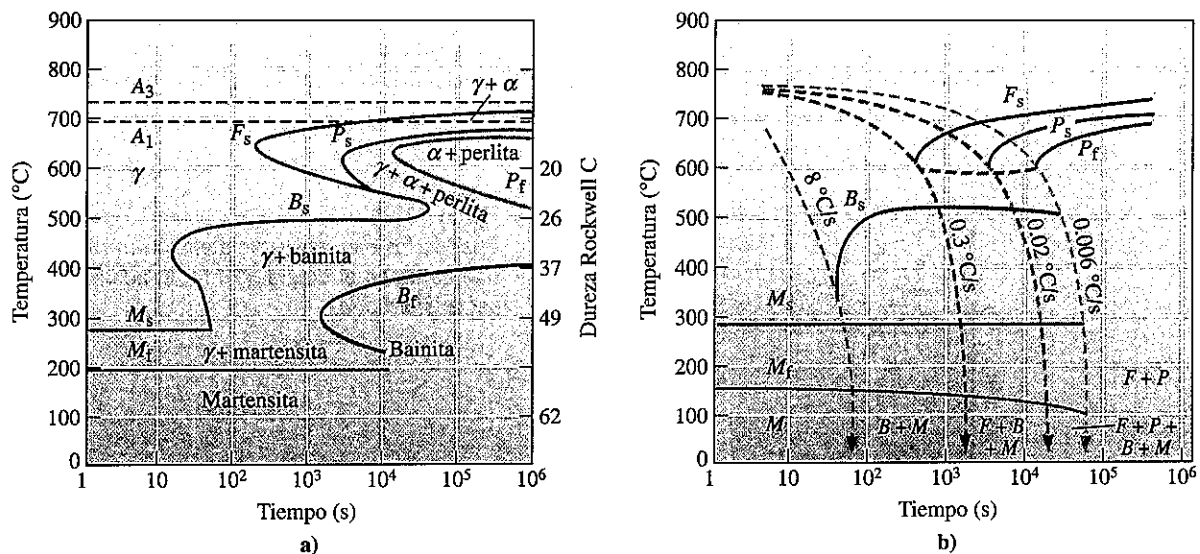


Figura 13-16 Curvas a) TTT y b) TEC para un acero 4340.

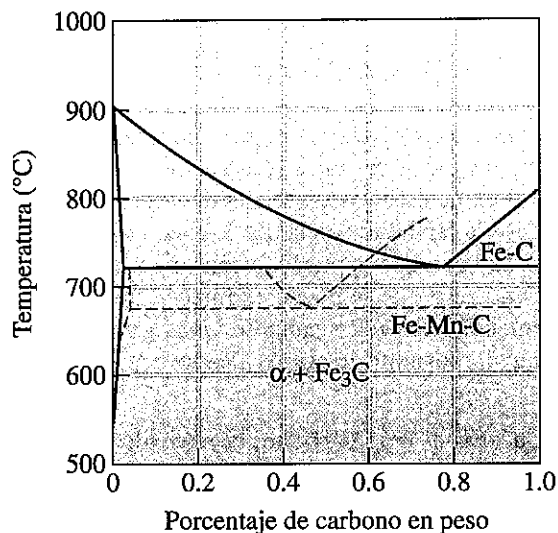


Figura 13-17

Efecto de 6% de manganeso en los intervalos de estabilidad de las fases en la parte eutéctica del diagrama de fases de Fe-Fe₃C.

reacción eutéctica y cambian las temperaturas A_1 , A_3 y A_{cm} . Un acero que contiene sólo 0.6% de C es hipoeutéctico y operaría a 700 °C sin formar austenita; el acero que de otra forma sería igual y que contiene 6% de Mn es hipereutéctico y se forma austenita a 700 °C.

Forma del diagrama TTT

Los elementos de aleación pueden introducir una región de “bahía” en el diagrama TTT, como en el caso del acero 4340 (figura 13-16). La región de bahía se usa como base para un tratamiento térmico termomecánico conocido como **deformación de la austenita metaestable hacia 500 °C (ausformado)**. Un acero puede ser austenitizado, templado hasta la región de bahía, plásticamente deformado y, por último, templado para producir martensita (figura 13-18). Los aceros sujetos a este tratamiento se conocen como *aceros ausformados*.

Revenido

Los elementos de aleación reducen la rapidez de revenido en comparación con la de un acero al bajo carbono simple (figura 13-19). Este efecto puede permitir que los aceros de aleación operen en forma más satisfactoria a temperaturas más altas que los aceros al bajo carbono simples, porque el exceso de envejecimiento no ocurre durante el servicio.

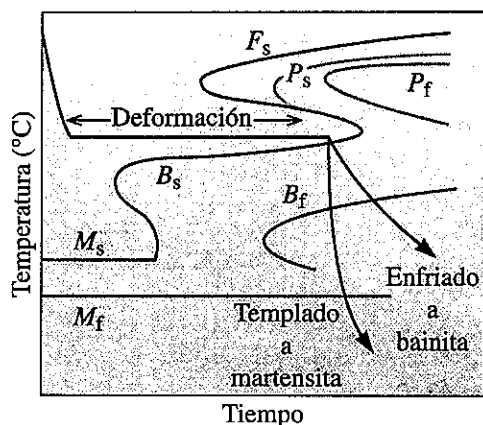


Figura 13-18

Cuando los elementos de aleación introducen una bahía en el diagrama TTT, el acero puede ser *ausformado*.

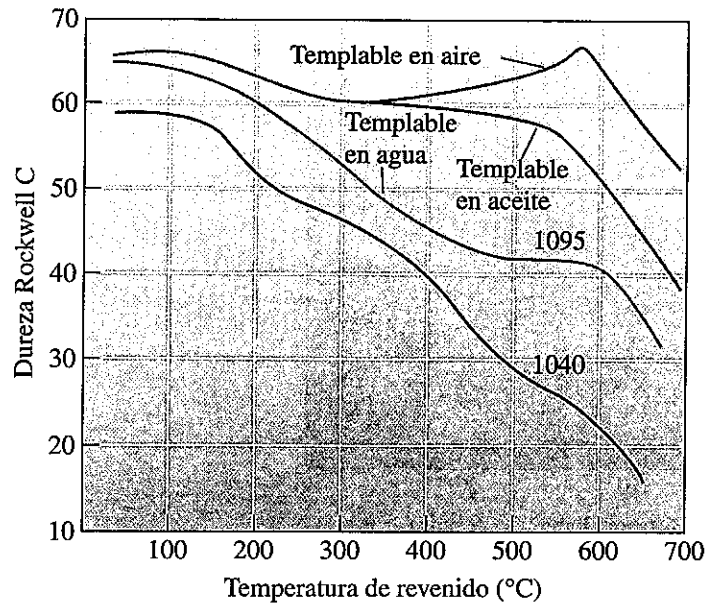


Figura 13-19
Efecto de los elementos de aleación en las fases formadas durante el revenido de aceros. El acero que se puede temprar al aire muestra un pico de endurecimiento secundario.

13-6 Aplicación de la templabilidad

Se utiliza una **prueba de Jominy** (figura 13-20) para comparar la templabilidad de aceros. Una barra de acero de 4 pulgadas de largo y 1 pulgada de diámetro es austenizada, colocada en un aparato y rociada con agua en un extremo. Este procedimiento produce una amplia variedad de magnitudes de rapidez de enfriamiento: muy rápida en el extremo templado y casi con enfriamiento al aire en el extremo opuesto. Después de la prueba, se hacen mediciones de dureza a lo largo del espécimen de prueba y se grafican para obtener la **curva de templabilidad** (figura 13-21). La distancia desde el extremo templado es la **distancia Jominy** y está relacionada con la rapidez de enfriamiento (tabla 13-3).

Prácticamente cualquier acero se transforma en martensita en el extremo templado. Entonces, la dureza a la distancia Jominy de cero está determinada sólo por el contenido de carbono del acero. A mayores distancias de Jominy, hay una más alta probabilidad de que se formen bainita o perlita en lugar de martensita. Un acero de aleación con alta templabilidad (por ejemplo el 4340) mantiene una curva de templabilidad más bien plana; un acero al bajo

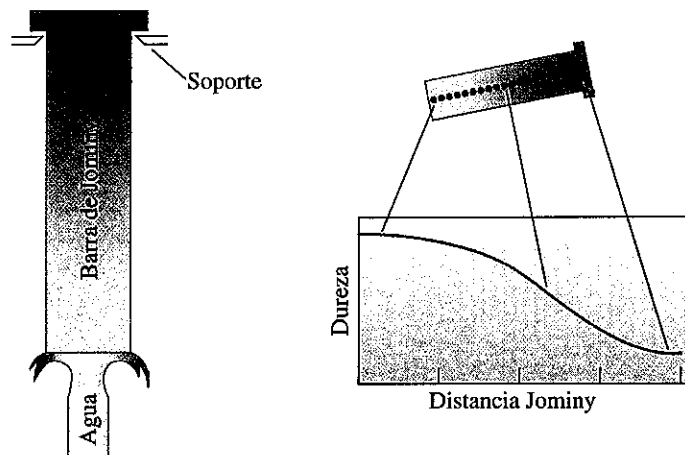


Figura 13-20
Montaje para la prueba de Jominy empleada para determinar la templabilidad de un acero.

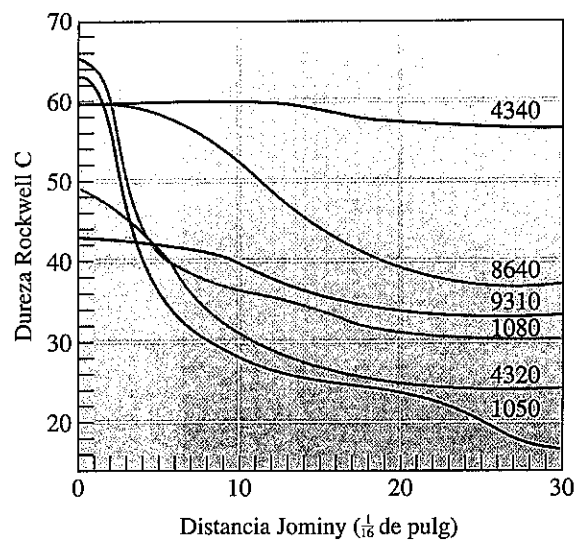


Figura 13-21 Curvas de templabilidad para varios aceros.

carbono (por ejemplo el 1050) tiene una curva que baja rápidamente. La templabilidad está determinada principalmente por el contenido de aleación del acero.

Se pueden usar curvas de templabilidad para seleccionar o sustituir aceros en aplicaciones prácticas. El hecho de que dos aceros diferentes se enfríen a la misma rapidez, si se templen bajo condiciones idénticas, ayuda en este proceso de selección. Los datos de la prueba de Jominy se usan como se muestra en el ejemplo siguiente.

TABLA 13-3 ■ Relación entre la rapidez de enfriamiento y la distancia Jominy

Distancia Jominy (pulg)	Rapidez de enfriamiento (°C/s)
$\frac{1}{16}$	315
$\frac{2}{16}$	110
$\frac{3}{16}$	50
$\frac{4}{16}$	36
$\frac{5}{16}$	28
$\frac{6}{16}$	22
$\frac{7}{16}$	17
$\frac{8}{16}$	15
$\frac{10}{16}$	10
$\frac{12}{16}$	8
$\frac{16}{16}$	5
$\frac{20}{16}$	3
$\frac{24}{16}$	2.8
$\frac{28}{16}$	2.5
$\frac{36}{16}$	2.2

Ejemplo 13-5*Diseño de un engrane para frenar el desgaste*

Un engrane hecho de acero 9310, que tiene una dureza según se templó en un punto crítico de DRC 40, se desgasta con una rapidez excesiva. Pruebas hechas han demostrado que se requiere una dureza después del templado de al menos DRC 50 en ese punto crítico. Diseñe un acero que sea apropiado.

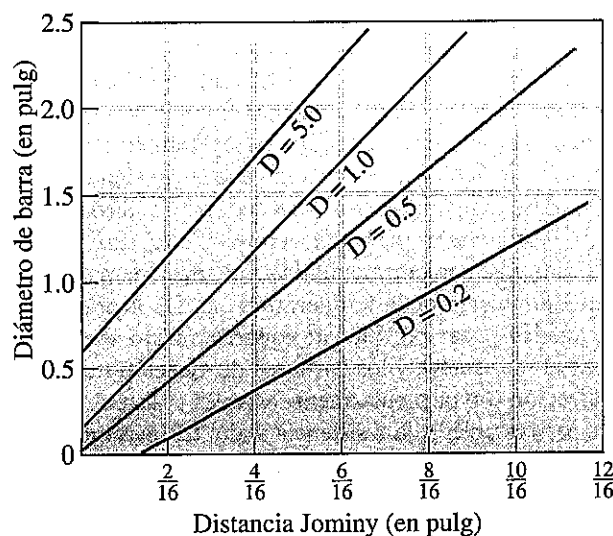
SOLUCIÓN

Se sabe que si diferentes aceros de las mismas dimensiones se templan bajo condiciones idénticas, sus magnitudes de rapidez de enfriamiento o distancias Jominy son las mismas. De la figura 13-21, una dureza de DRC 40 en un acero 9310 corresponde a una distancia Jominy de 10/16 de pulg (10 °C/s). Si se supone la misma distancia Jominy, los otros aceros que se ilustran en la figura 13-21 tienen las siguientes durezas en el punto crítico:

1050 DRC 28
1080 DRC 36
4320 DRC 31
8640 DRC 52
4340 DRC 60

Tanto el acero 8640 como el 4340 son apropiados. El acero 4320 tiene un contenido demasiado bajo de carbono para alcanzar la dureza DRC 50; los 1050 y 1080 tienen suficiente carbono, pero la templabilidad es demasiado baja. En la tabla 13-1, se encuentra que los aceros 86xx contienen menos elementos de aleación que los aceros 43xx; entonces, el acero 8640 es probablemente menos costoso que el acero 4340 y podría ser la mejor opción. También se deben considerar otros factores tales como la durabilidad.

En otra técnica sencilla, se utiliza la severidad del templado y la gráfica de Grossman (figura 13-22) para determinar la dureza en el *centro* de una barra redonda. El diámetro de la barra y el coeficiente H, o severidad del templado en la tabla 13-2, dan la distancia Jominy en el centro de la barra. Es posible entonces determinar la dureza a partir de la curva de templabilidad del acero. (Véase el ejemplo 13-6.)

**Figura 13-22**

Gráfica de Grossman empleada con el fin de determinar la templabilidad en el centro de una barra de acero para diferentes medios de temple.

Ejemplo 13-6

Diseñe un proceso de templado para producir una dureza mínima de DRC 40 en el centro de una barra de acero 4320 de 1.5 pulgadas de diámetro.

SOLUCIÓN

En la tabla 13-2 aparecen varios medios de temple. Es posible hallar un coeficiente H aproximado para cada uno de los medios de temple, y a continuación usar la figura 13-22 para estimar la distancia Jominy en una barra de 1.5 pulgadas de diámetro para cada medio. Por último, se puede usar la curva de templabilidad (figura 13-21) para hallar la dureza en el acero 4320. Los resultados aparecen a continuación.

	Coeficiente H	Distancia Jominy	DRC
Aceite (sin agitación)	0.25	12/16	28
Aceite (con agitación)	1.00	6/16	39
H ₂ O (sin agitación)	1.00	6/16	39
H ₂ O (con agitación)	4.00	4/16	44
Salmuera (sin agitación)	2.00	5/16	42
Salmuera (con agitación)	5.00	3/16	46

Los últimos tres métodos, basados en salmuera o agua agitada, son satisfactorios. Usando un medio para rápido enfriamiento de salmuera sin agitación podría ser el menos costoso, dado que no se necesita de equipo extra para agitar el baño de temple; no obstante, el H₂O es menos corrosivo que el medio para rápido enfriamiento de salmuera.

13-7 Aceros especiales

Hay numerosas categorías especiales de aceros, incluyendo aceros para herramienta, aceros sin intersticios, aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA), aceros de fase dual y aceros martensíticos envejecibles.

Los **aceros para herramienta** por lo general son aceros al alto carbono que obtienen alta dureza por medio de un tratamiento térmico de templado y revenido. Sus aplicaciones incluyen herramientas de corte en operaciones de maquinado, matrices para el colado en matriz, dados de conformación y otros usos en los que es necesaria una combinación de alta resistencia, dureza, tenacidad y resistencia a la temperatura.

Los elementos de aleación mejoran la templabilidad y estabilidad a alta temperatura de los aceros para herramienta. Los aceros que se pueden temprar en agua, por ejemplo el 1095, deben ser templados rápidamente para producir martensita y también suavizarse con gran rapidez incluso a temperaturas relativamente bajas. Los aceros que se pueden temprar en aceite forman martensita con más facilidad, se templan con más lentitud, pero todavía se suavizan a altas temperaturas. Los aceros para herramienta que se pueden temprar al aire, y los especiales, pueden endurecerse hasta llegar a martensita mientras se enfrían al aire. Además, estos aceros pueden no suavizarse sino hasta que están cerca de la temperatura A_1 . De hecho, los aceros para herramienta de alta aleación pueden pasar por **pico de endurecimiento secundario** cerca de 500 °C cuando la cementita normal se disuelve y los carburos de aleación duros se precipitan (figura 13-19). Los carburos de aleación son particularmente estables, resisten el crecimiento o esferoidización y son importantes para establecer la resistencia a alta temperatura de estos aceros.

Los aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA) son aceros al bajo carbono que contienen pequeñas cantidades de elementos de aleación. Los aceros HSLA están especificados en base a la resistencia a la fluencia con grados hasta de 80 000 psi; los aceros contienen

la mínima cantidad de elemento de aleación que todavía proporciona la resistencia a la fluencia apropiada sin tratamiento térmico. En estos aceros, un cuidadoso procesamiento permite la precipitación de carburos y nitruros de Nb, V, Ti o Zr, que dan endurecimiento por dispersión y un tamaño fino de grano.

Los **aceros de fase dual** contienen una distribución uniforme de ferrita y martensita, con la martensita dispersa que da límites elásticos de 60 000 a 145 000 psi. Estos aceros al bajo carbono no contienen suficientes elementos de aleación para tener buena templabilidad usando los procesos normales de revenido. Pero, cuando el acero se calienta en la parte de ferrita más austenita del diagrama de fases, la fase de austenita se enriquece en carbono y esto da la templabilidad necesaria. Durante el templeado, sólo la parte de austenita se transforma en martensita [figura 13-23a)].

La microestructura de los **aceros TRIP** [figura 13-23b)] está formada por una matriz continua de ferrita y una dispersión de una segunda fase más dura (martensita y/o bainita). Además, la microestructura consta de austenita retenida. Los aceros TRIP exhiben una mejor ductilidad y capacidad para la conformación a un nivel determinado de resistencia, debido a la transformación de austenita retenida en martensita durante la deformación plástica. Los aceros de plasticidad inducida por transformación (TRIP) son útiles para formas más complejas.

Los **aceros martensíticos envejecibles** son aceros bajos en carbono y altamente aleados. Los aceros se austenitizan y templean para producir una martensita blanda que contiene menos de 0.3% de C. Cuando la martensita se envejece a unos 500 °C, se precipitan compuestos intermetálicos como el Ni_3Ti , Fe_2Mo y Ni_3Mo .

Los **aceros sin intersticios** son aceros que contienen Nb y Ti. Reaccionan con C y S para formar precipitados de carburos y sulfuros. Entonces, prácticamente no queda carbono en la ferrita. Estos aceros son de fácil conformación y, por tanto, son atractivos para la industria automotriz.

Los aceros de grano orientado que contienen silicio se usan como materiales magnéticos blandos y se usan en núcleos para transformadores. Casi polvo puro de hierro (conocido como carbonilo de hierro), obtenido por la descomposición de pentacarbonilo de hierro $[\text{Fe}(\text{CO})_5]$ y a veces un tratamiento térmico reductor, se usa para hacer materiales magnéticos. El polvo puro de hierro se usa también como aditivo para suplementos alimenticios en cereales para el desayuno y otros productos alimenticios fortificados con hierro bajo el nombre de hierro reducido.

Como ya se mencionó, muchos aceros también están recubiertos, por lo general para obtener buena protección contra la corrosión. El acero *galvanizado* está recubierto con una delgada capa de zinc (capítulo 23), el acero *terne* está recubierto con plomo, y otros aceros tienen recubrimiento de aluminio o estaño.

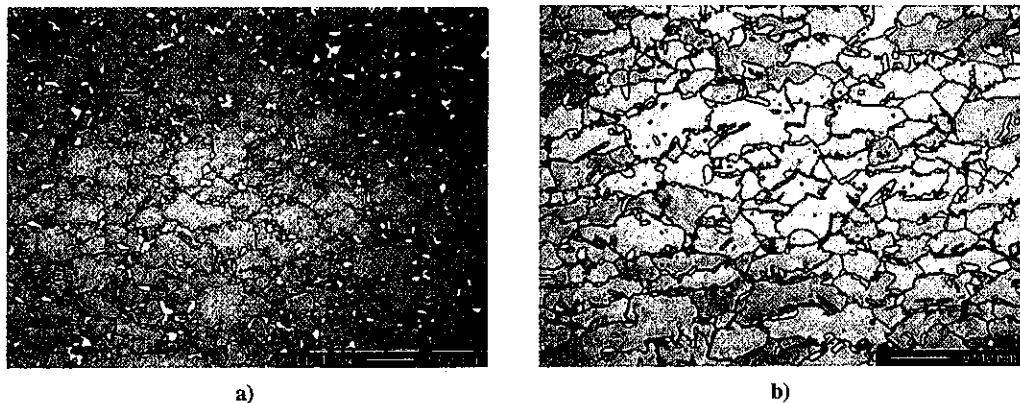


Figura 13-23 a): Microestructura de un acero de fase dual, que muestra islas de martensita blanca en una matriz de ferrita gris claro. (De G. Speich, "Physical Metallurgy of Dual-Phase Steels", *Fundamentals of Dual-Phase Steels*, The Metallurgical Society of AIME, 1981.)
b) Microestructura de un acero TRIP, que muestra ferrita (gris claro) + bainita (negro a lo largo de límites de grano) + austenita retenida (blanca). (Cortesía de D. P. Hoydick, D. M. Haezebrouck y E. A. Silva, *United States Steel Corporation Research and Technology Center*, 2005.)

13-8 Tratamientos superficiales

Es posible producir, por medio de un tratamiento térmico apropiado, una estructura que sea dura y fuerte en la superficie, de modo que se obtiene excelente resistencia al desgaste y la fatiga, pero al mismo tiempo da un núcleo blando, dúctil y tenaz que proporciona buena resistencia a la falla por impacto. En el capítulo 5 se analizaron principios del carburizado, cuando se estudió la difusión. En esta sección, se ven éste y otros procesos similares.

Calentamiento selectivo de la superficie Se podría empezar por calentar rápidamente la superficie de un acero al medio carbono arriba de la temperatura A_3 (el centro continúa por debajo de A_1). Después de templar el acero, el centro es todavía una mezcla blanda de ferrita y perlita, en tanto que la superficie es martensita (figura 13-24). La profundidad de la capa de martensita es la **profundidad de cementado**. El revenido produce la dureza deseada en la superficie. Es posible calentar en forma local la superficie usando una flama de gas, una bobina de inducción, un rayo láser o un haz electrónico. Se puede, si así se quiere, endurecer sólo áreas seleccionadas de la superficie que estén más sujetas a la falla por fatiga o por desgaste.

Carburizado y nitruración Estas técnicas se refieren a la difusión controlada de carbono y nitrógeno, respectivamente (capítulo 5). Para una mejor tenacidad, hay que empezar con un acero bajo en carbono. En el **carburizado**, el carbono se difunde en la superficie del acero a una temperatura por encima de la A_3 (figura 13-25). Se produce un alto contenido de carbono en la superficie debido a la rápida difusión y a la alta solubilidad del carbono en austenita. Cuando el acero es entonces templado y revenido, la superficie se convierte en martensita revenida al alto carbono, en tanto que el centro ferrítico continúa siendo blando y dúctil. El grosor de la superficie endurecida, de nuevo llamada profundidad de cementado, es mucho menor en aceros carburizados que en aceros endurecidos por flama o inducción.

El nitrógeno produce un efecto de endurecimiento similar al del carbono. En la **cianurización**, el acero se sumerge en un baño de cianuro líquido que permite que el carbono y el nitrógeno se difundan en el acero. En la **carbonitruración**, se genera un gas que contiene monóxido de carbono y amoníaco y tanto el carbono como el nitrógeno se difunden en el acero. Por último, sólo el nitrógeno se difunde en la superficie a partir de un gas en la **nitruración**. La nitruración se realiza por debajo de la temperatura A_1 .

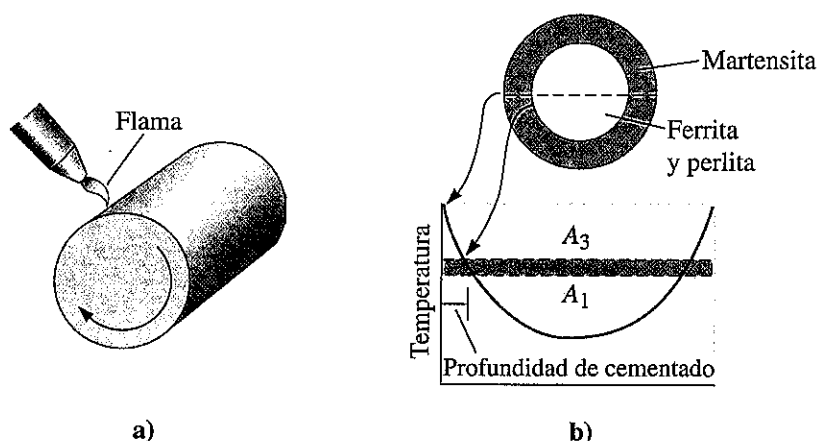


Figura 13-24 a) Endurecimiento superficial por calentamiento localizado. b) Sólo la superficie se calienta arriba de la temperatura A_1 y es templada para producir martensita.

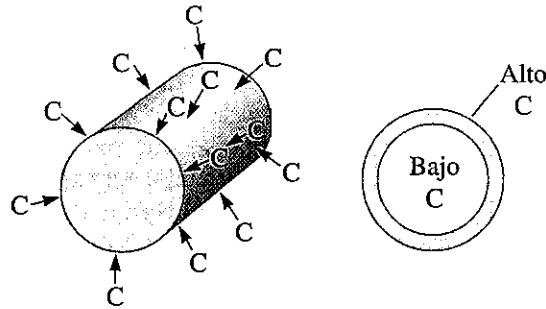


Figura 13-25
Carburizado de un acero al bajo carbono para producir una superficie al alto carbono, resistente al desgaste.

En cada uno de estos procesos, se introducen esfuerzos residuales de compresión en la superficie, que dan una excelente resistencia a la fatiga (capítulo 7) además de una buena combinación de dureza, resistencia y tenacidad. El siguiente ejemplo explica consideraciones para tratamientos térmicos tales como templado y revenido además del endurecimiento superficial.

Ejemplo 13-7

Diseño de tratamientos de endurecimiento superficial para un tren de engranes

Seleccione los materiales y diseñe tratamientos térmicos para el eje y el tren de engranes de un automóvil (figura 13-26).

SOLUCIÓN

Ambas piezas exigen buena resistencia a la fatiga. El engrane debe tener una buena dureza para evitar el desgaste, y el eje debe tener buena resistencia general para resistir cargas de flexión y de torsión. Las dos piezas deben tener buena tenacidad. Por último, como se fabricarán millones de estas piezas, deben ser de bajo costo.

Los aceros de aleación templados y revenidos podrían dar la combinación requerida de resistencia y tenacidad, pero los aceros de aleación son costosos. A continuación se describe un método alternativo para cada pieza.

El eje podría hacerse de un acero 1050 forjado que contenga una matriz de ferrita y perlita. El eje podría ser endurecido en su superficie, quizá al mover el eje por una bobina de inducción para calentar selectivamente la superficie del acero por arriba de la temperatura A_3 (unos 770°C). Después de que la bobina pasa cualquier lugar particular del eje, el interior frío temple la superficie a martensita. El revenido entonces ablanda

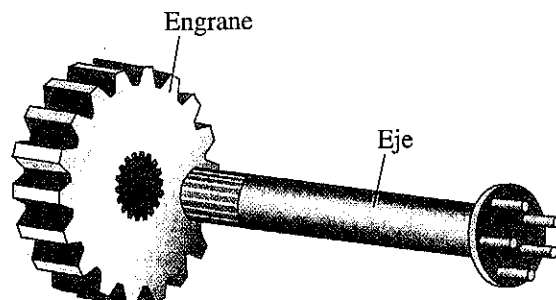


Figura 13-26
Bosquejo de un conjunto de eje y engrane (para el ejemplo 13-7).

la martensita para mejorar la ductilidad. Esta combinación del contenido de carbono y del tratamiento térmico satisface las necesidades. El acero al bajo carbono es de poco costo; el núcleo de ferrita y perlita produce buena tenacidad y resistencia, y la superficie endurecida da buena resistencia a la fatiga y al desgaste.

El engrane está sujeto a condiciones de carga más severas, por lo cual el acero 1050 no da tenacidad, dureza y resistencia al desgaste suficientes. En cambio, se puede carburizar un acero 1010 para el engrane. El acero original contiene ferrita en su mayor parte, que da buena ductilidad y tenacidad. Al realizar un proceso de carburizado con gas arriba de la temperatura A_3 (unos 860 °C), se introduce alrededor de 1.0% de C en una muy delgada capa superficial de los dientes del engrane. Este cementado al alto carbono, que se transforma en martensita durante el templeado, se reviene para controlar la dureza. Ahora se obtiene tenacidad debido al núcleo de ferrita al bajo carbono, resistencia al desgaste debida a la superficie al alto carbono, y resistencia a la fatiga debida a la superficie de alta resistencia que contiene esfuerzos residuales por compresión introducidos durante el carburizado. Además, el acero 1010 al bajo carbono es un material inicial de poco costo que es forjado fácilmente en una forma casi líquida antes del tratamiento térmico.

13-9 Soldabilidad del acero

En el capítulo 9 se estudió la soldadura y otros procesos de unión. Se observó que los aceros son los materiales estructurales de más amplio uso. En puentes, edificios y muchas otras aplicaciones, los aceros deben ser soldados. La integridad estructural de las estructuras de acero no sólo depende de la resistencia del acero, sino también de la resistencia de las uniones soldadas. Ésta es la razón por la cual la soldabilidad del acero es siempre una consideración importante.

Muchos aceros al bajo carbono se sueldan con gran facilidad. La soldadura en aceros al medio y alto carbono es comparativamente más difícil porque se puede formar con facilidad martensita en la zona afectada por el calor, lo cual produce una soldadura con mala tenacidad. Para contrarrestar estos problemas se han ideado varias estrategias por ejemplo el precalentamiento del material o minimizar la incorporación de hidrógeno; esta incorporación de hidrógeno hace quebradizo al acero. En aceros al bajo carbono, la resistencia de las regiones soldadas en estos materiales es más alta que el material base, lo cual se debe a la microestructura más fina de perlita que se forma durante el enfriamiento de la zona afectada por el calor. La austenita retenida a lo largo de límites de granos de ferrita también limita la recrystalización y por tanto ayuda a retener un tamaño de grano fino, que contribuye a la resistencia de la región soldada. Durante la soldadura, el metal más cercano a la soldadura se calienta arriba de la temperatura A_1 y se forma austenita (figura 13-27). Durante el enfriamiento, la austenita en esta zona afectada por el calor se transforma en una nueva estructura, dependiendo de la rapidez de enfriamiento y del diagrama TEC para el acero. Los aceros al bajo carbono tienen tan baja templabilidad que la rapidez normal de enfriamiento raras veces produce martensita; no obstante, puede ser necesario que un acero de aleación tenga que ser calentado antes para hacer más lenta la rapidez de enfriamiento, o ser calentado posteriormente para revenir cualquier martensita que se forme.

Un acero que está originalmente templeado y revenido tiene dos problemas durante la soldadura. Primero, la parte de la zona afectada por el calor que se calienta arriba de la temperatura A_1 puede formar martensita después de enfriarse. En segundo término, la parte afectada por el calor debajo de A_1 puede revenirse demasiado. Normalmente, no debe soldarse un acero en condiciones de templeado y revenido. El siguiente ejemplo muestra la forma en que la microestructura de la zona afectada por el calor puede ser tomada en cuenta para usar diagramas TEC.

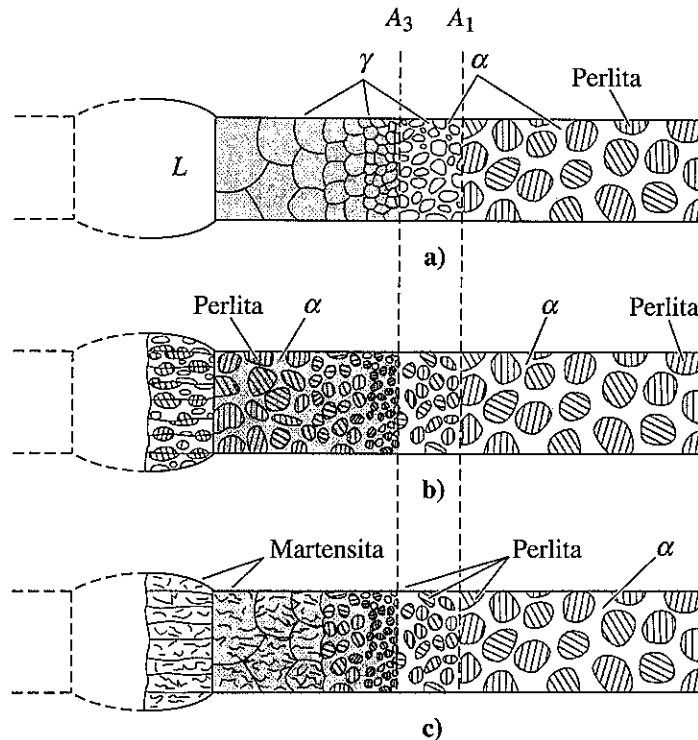


Figura 13-27 Desarrollo de la zona afectada por el calor en una soldadura: a) estructura a la máxima temperatura, b) estructura después de enfriarse en un acero de baja templabilidad y c) estructura después de enfriarse en un acero de alta templabilidad.

Ejemplo 13-8 Estructuras de zonas afectadas por calor

Compare las estructuras de las zonas afectadas por el calor de soldaduras en aceros 1080 y 4340, si la rapidez de enfriamiento en la zona afectada por el calor es de 5°C/s .

SOLUCIÓN

De los diagramas TEC, figuras 13-14 y 13-16, la rapidez de enfriamiento en la soldadura produce las siguientes estructuras:

1080: 100% perlita
4340: bainita y martensita

La alta templabilidad del acero de aleación reduce su soldabilidad, lo cual permite que se forme martensita y que la soldadura se haga quebradiza.

13-10 Aceros inoxidables

Los **aceros inoxidables** se seleccionan debido a su excelente resistencia a la corrosión. Todos los aceros verdaderamente inoxidables contienen un mínimo de alrededor de 11% de Cr, lo cual permite que se forme una capa delgada y protectora de óxido de cromo cuando el acero

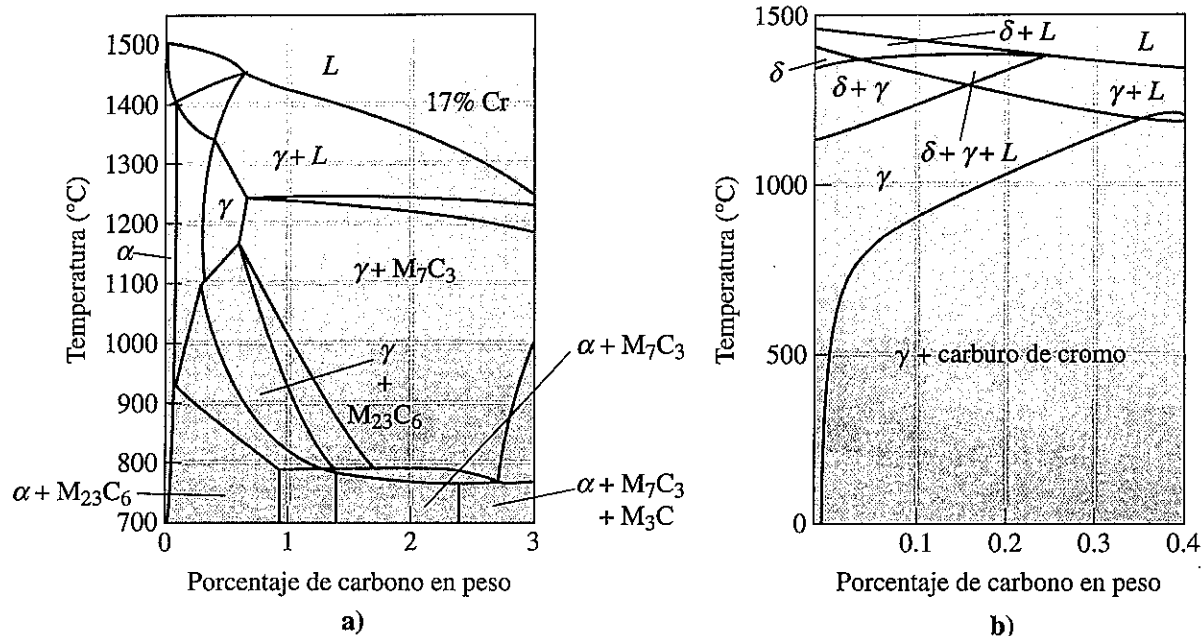


Figura 13-28 a) Efecto de 17% de cromo en un diagrama de fases de hierro-carbono. Con bajo contenido de carbono, la ferrita es estable en todas las temperaturas. Nótese que "M" representa "metal" tales como el Cr y Fe u otras adiciones de aleación. b) Una sección del diagrama de fases de hierro-cromo-níquel-carbono a 18% Cr-8% Ni constantes. Con bajo contenido de carbono, la austenita es estable a temperatura ambiente.

se expone al oxígeno. El cromo es lo que hace inoxidable a este tipo de aceros. El cromo es también un *elemento estabilizador de ferrita*. La figura 13-28a) ilustra el efecto del cromo en el diagrama de fases de hierro-carbono. El cromo hace que la región de austenita se contraiga, en tanto que la región de ferrita aumenta en tamaño. Para composiciones al bajo carbono y alto cromo, la ferrita está presente como una sola fase hasta la temperatura de la curva final de solidus.

Hay varias categorías de aceros inoxidables basadas en su estructura cristalina y en el mecanismo de endurecimiento. Las propiedades comunes se dan en la tabla 13-4.

Aceros inoxidables ferríticos Los aceros inoxidables ferríticos contienen hasta 30% de Cr y menos de 0.12% de C. Debido a la estructura CCCu, los aceros inoxidables ferríticos tienen buena resistencia y moderada ductilidad derivadas del endurecimiento por solución sólida y endurecimiento por deformación. Los aceros inoxidables ferríticos son ferromagnéticos. No son susceptibles a un tratamiento térmico. Tienen excelente resistencia a la corrosión, capacidad moderada de formación y son relativamente económicos.

Aceros inoxidables martensíticos De la figura 13-28a) se encuentra que una aleación de 17% de Cr-0.5% de C calentada a 1200 °C forma un 100% de austenita, que se transforma en martensita al templarse en aceite. La martensita se reviene entonces para producir alta resistencia y dureza [figura 13-29a)]. El contenido de cromo es por lo general menor a 17% de Cr; de otro modo, el campo de austenita se hace tan pequeño que se requiere de un control muy estricto tanto en la temperatura de austenitización como en el contenido de carbono. Contenidos de cromo más bajos también permiten que el contenido de carbono varíe de alrededor de 0.1 a 1.0%, lo cual permite que se produzcan martensitas de diferentes durezas. La combinación de dureza, fuerza y resistencia a la corrosión hace que las aleaciones sean atractivas para aplicaciones como cuchillería de alta calidad, cojinetes de bolas y válvulas.

TABLA 13-4 ■ Composiciones y propiedades comunes de aceros inoxidables

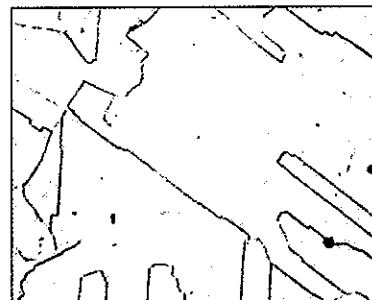
Acero	% C	% Cr	% Ni	Otros	Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia a la fluencia (psi)	% de elongación	Condición
Austenítico								
201	0.15	17	5	6.5% Mn	95 000	45 000	40	Recocido
304	0.08	19	10		75 000	30 000	30	Recocido
					185 000	140 000	9	Trabajado en frío
304L	0.03	19	10		75 000	30 000	30	Recocido
316	0.08	17	12	2.5% Mo	75 000	30 000	30	Recocido
321	0.08	18	10	0.4% Ti	85 000	35 000	55	Recocido
347	0.08	18	11	0.8% Nb	90 000	35 000	50	Recocido
Ferrítico								
430	0.12	17			65 000	30 000	22	Recocido
442	0.12	20			75 000	40 000	20	Recocido
Martensítico								
416	0.15	13		0.6% Mo	180 000	140 000	18	Templado y revenido
431	0.20	16	2		200 000	150 000	16	Templado y revenido
440C	1.10	17		0.7% Mo	285 000	275 000	2	Templado y revenido
Endurecimiento por precipitación								
17-4	0.07	17	4	0.4% Nb	190 000	170 000	10	Endurecido por envejecimiento
17-7	0.09	17	7	1.0% Al	240 000	230 000	6	Endurecido por envejecimiento

Aceros inoxidables austeníticos El níquel, que es un *elemento estabilizador de la austenita*, aumenta el tamaño del campo austenítico, al mismo tiempo que casi elimina la ferrita de las aleaciones de hierro-cromo-carbono [figura 13-28b)]. Si el contenido de carbono está por debajo de alrededor de 0.03%, los carburos no se forman y el acero es prácticamente sólo austenita a temperatura ambiente [figura 13-29b)].

Los aceros inoxidables austeníticos CCCa tienen excelente ductilidad, capacidad para su conformación y resistencia a la corrosión. La resistencia se obtiene por un extenso endure-



a)



b)

Figura 13-29 a) Acero inoxidable martensítico que contiene carburos primarios grandes y carburos pequeños formados durante el revenido (350×). b) Acero inoxidable austenítico (500×). (De ASM Handbook, vols. 7 y 8 (1972, 1973), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.)

cimiento por solución sólida, y los aceros inoxidable pueden ser trabajados en frío para darles resistencia más alta que los aceros inoxidable ferríticos. No son ferromagnéticos, lo cual es una ventaja para numerosas aplicaciones. Por ejemplo, a veces se hacen "stents" (cánulas) cardiovasculares de aceros inoxidable 316. Los aceros tienen excelentes propiedades de impacto a baja temperatura porque no tienen temperatura de transición. Desafortunadamente, el contenido alto de cromo y níquel hacen costosas estas aleaciones. La aleación 304 que contiene 18% de Cr y 8% de Ni (también conocida como inoxidable 18-8) es el grado de más amplio uso del acero inoxidable. Aun cuando es inoxidable, esta aleación puede experimentar **sensitización**. Cuando se calienta a una temperatura de $\sim 480\text{--}860^\circ\text{C}$, se precipita carburo de cromo a lo largo de límites de granos en vez de dentro de los granos. Esto ocasiona un agotamiento de cromo en el interior de los granos y hace que el acero inoxidable se corroa muy fácilmente.

Aceros inoxidable endurecidos por precipitación [EP]

Los aceros inoxidable endurecidos por precipitación (o EP) contienen Al, Nb o Ta y derivan sus propiedades a partir del endurecimiento por solución sólida, endurecimiento por deformación, endurecimiento por envejecimiento y la reacción martensítica. El acero se calienta primeramente y se temple para permitir que la austenita se transforme en martensita. Un recalentamiento permite que se formen precipitados como el Ni_3Al a partir de la martensita. Se obtienen altas resistencias incluso con un bajo contenido de carbono.

Aceros inoxidable dúplex En algunos casos, deliberadamente se introducen mezclas de fases en la estructura del acero inoxidable. Por medio de un control apropiado de la composición y del tratamiento térmico, se puede producir un **acero inoxidable dúplex** que contiene aproximadamente 50% de ferrita y 50% de austenita. Esta combinación da un conjunto de propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión, así como capacidad para la conformación y soldadura que no se obtienen en ninguno de los aceros inoxidable usuales.

La mayor parte de los aceros inoxidable son reciclables y el siguiente ejemplo muestra la forma en que se pueden usar las diferencias en propiedades para separar distintos tipos de aceros inoxidable.

Ejemplo 13-9

Diseño de una prueba para separar aceros inoxidable

Para reciclar chatarra de acero inoxidable eficientemente, se desea separar el acero inoxidable al alto níquel del acero inoxidable al bajo níquel. Diseñe un método para hacer esto.

SOLUCIÓN

Realizar un análisis químico en cada pieza de chatarra es tedioso y costoso. Clasificarlos con base en la dureza puede ser menos costoso, pero, debido a los diferentes tipos de tratamientos, por ejemplo recocido, trabajo en frío o templado y revenido, la dureza puede no estar relacionada con la composición del acero.

Los aceros inoxidable al alto níquel son austeníticos por lo general, mientras que las aleaciones al bajo níquel son ferríticas y martensíticas. Un imán ordinario será atraído por los aceros al bajo níquel ferríticos y martensíticos, pero no será atraído por el acero al alto níquel austenítico. Se podría especificar esta sencilla y poco costosa prueba magnética para el proceso de separación.

13-11 Hierros fundidos

Los **hierros fundidos** son aleaciones de hierro-carbono-silicio, que por lo general contienen 2-4% de C y 0.5-3% de Si, que pasan por la reacción eutéctica durante su solidificación. Las microestructuras de los cinco tipos importantes de hierros fundidos se muestran esquemáticamente en la figura 13-30.

Reacción eutéctica en hierros fundidos Con base en el diagrama de fases de Fe-Fe₃C (líneas discontinuas en la figura 13-31), la reacción eutéctica que ocurre en aleaciones de Fe-C a 1140 °C es



Esta reacción produce **hierro fundido blanco**, con una microestructura compuesta de Fe₃C y perlita. El sistema Fe-Fe₃C, no obstante, es en realidad un diagrama de fases metaestable. Bajo condiciones verdaderamente de equilibrio, la reacción eutéctica es



El diagrama de fases de Fe-C se ilustra mediante líneas continuas en la figura 13-31. Cuando ocurre la reacción eutéctica estable de $L \rightarrow \gamma + \text{grafito}$ a 1146 °C, se forma **hierro fundido gris**, dúctil o con **grafito compactado**.

En aleaciones de Fe-C, el líquido fácilmente se subenfía 6 °C (la diferencia de temperatura entre las temperaturas eutécticas estables y metaestables), y se forma **hierro blanco**. Agregar alrededor de 2% de silicio al hierro aumenta la diferencia de temperatura entre las eutécticas, permitiendo que sean tolerados subenfriamientos más grandes y más tiempo para la nucleación y crecimiento del grafito eutéctico estable. El silicio, por tanto, es un elemento *estabilizador de grafito*. Elementos como el cromo y bismuto tienen el efecto opuesto y estimulan

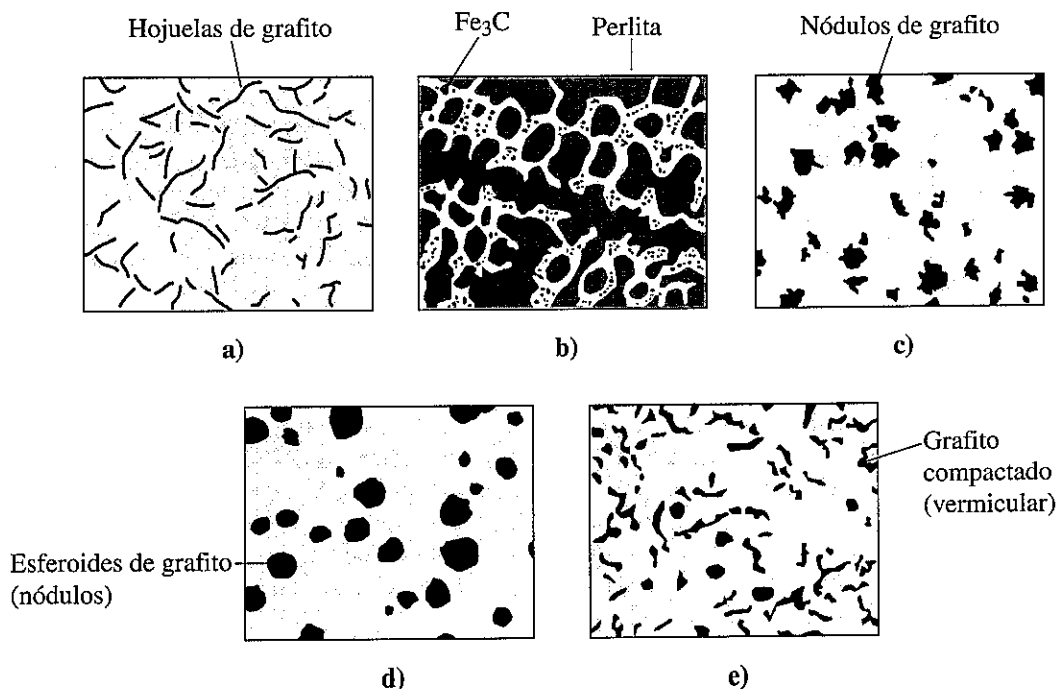


Figura 13-30 Dibujos esquemáticos de los cinco tipos de hierro fundido: a) hierro gris, b) hierro blanco, c) hierro maleable, d) hierro dúctil y e) hierro con grafito compactado.

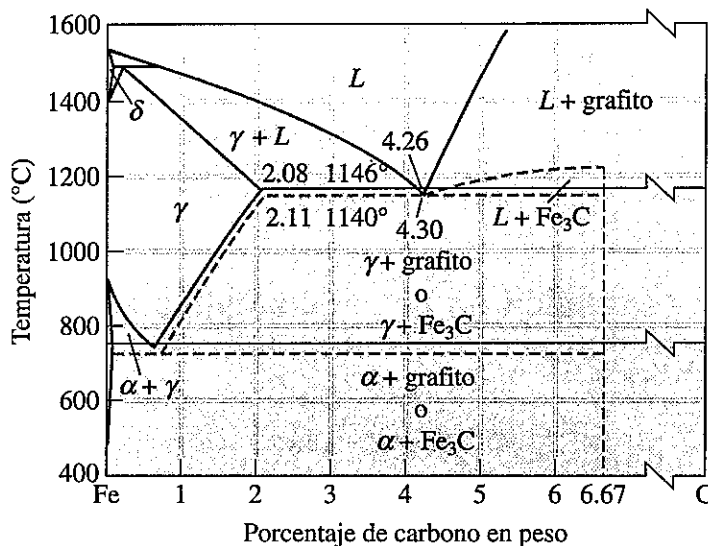


Figura 13-31 Diagrama de fases de hierro-carbono que muestra la relación entre equilibrios estables de hierro-grafito (líneas continuas) y las reacciones metaestables de hierro-cementita (líneas discontinuas).

la formación de hierro fundido blanco. También se pueden introducir inoculantes, como el silicio (como ferrosilicio Fe-Si), para estimular la formación de núcleos de grafito, o es posible reducir la rapidez de enfriamiento de la pieza colada para dar más tiempo para el crecimiento de grafito.

El silicio también reduce la cantidad de carbono contenido en el eutéctico. Se puede tomar en cuenta este efecto al definir el **equivalente de carbono (EC)**:

$$EC = \% C + \frac{1}{3} \% Si \quad (13-3)$$

La composición eutéctica está siempre cercana a 4.3% de EC. Un carbono equivalente alto estimula el crecimiento del grafito eutéctico.

Reacción eutectoide en los hierros fundidos La estructura de la matriz y las propiedades de cada tipo de hierro fundido están determinadas por la forma en que la austenita se transforma durante la reacción eutectoide. En el diagrama de fases de Fe-Fe₃C que se emplea para los aceros, la austenita se transformó en ferrita y cementita, a veces en forma de perlita; no obstante, el silicio también estimula la reacción autectoide *estable*:



Bajo condiciones de equilibrio, se difunden átomos de carbono desde la austenita a las partículas existentes de grafito, dejando atrás la ferrita al bajo carbono. El diagrama de transformación (figura 13-32) describe cómo podría transformarse la austenita durante el tratamiento térmico. El **recocido** (o enfriamiento en horno) del hierro fundido da una matriz ferrítica blanda (no perlita gruesa como en los aceros). La normalización, o enfriado al aire, da una matriz perlítica. Los hierros fundidos también pueden someterse a un austemperizado en la fase austenítica para producir bainita o pueden ser templados a martensita y revenidos. El hierro dúctil austemperizado, con resistencias de hasta 200 000 psi, se usa para engranajes de alto desempeño.

La **fundición de hierro gris** contiene pequeñas hojuelas de grafito interconectadas que producen resistencia y ductilidad bajas. Éste es el hierro fundido de más uso y recibe ese nombre por el color gris deslustrado de la superficie fracturada. El hierro fundido gris contiene muchos conglomerados, o **celdas eutécticas**, de hojuelas interconectadas de grafito (figura

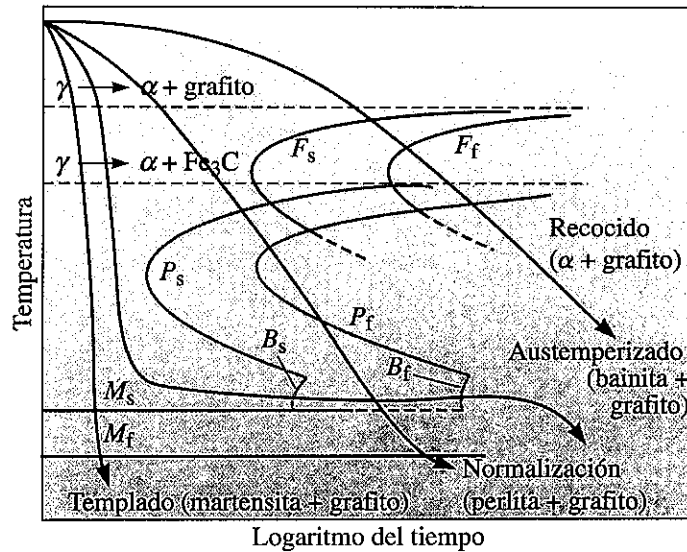


Figura 13-32 Diagrama de transformación para austenita en hierro fundido.

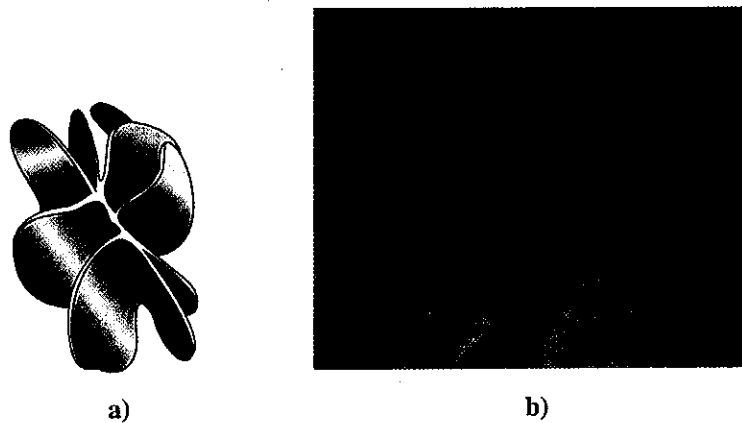


Figura 13-33 a) Bosquejo y b) micrografía del grafito en hojuelas en hierro fundido gris (100×). (Reimpreso por cortesía de Don Askeland.)

13-33). El punto en el que las hojuelas están conectadas es el núcleo original de grafito. La inoculación ayuda a producir celdas eutécticas más pequeñas, mejorando así la resistencia. Los hierros grises están especificados por un número de clase de 20 a 80. Un hierro gris clase 20 tiene una resistencia nominal a la tensión de 20 000 psi. En piezas coladas gruesas, las hojuelas de grafito gruesas y una matriz de ferrita producen resistencias a la tensión tan bajas como 12 000 psi (figura 13-34), en tanto que, en piezas coladas delgadas, el grafito y la perlita forman y dan resistencias a la tensión de cerca de 40 000 psi. Se obtienen resistencias más altas al reducir el equivalente de carbono, por aleación o por tratamiento térmico. Aun cuando las hojuelas de grafito concentran esfuerzos y producen resistencia y ductilidad bajas, el hierro gris tiene varias propiedades atractivas, incluyendo alta resistencia a la compresión, buena capacidad para ser maquinado, buena resistencia al desgaste por deslizamiento, buena resistencia a la fatiga térmica, buena conductividad térmica y buen amortiguamiento de vibraciones.

La **fundición de hierro blanco** es una aleación dura y quebradiza que contiene grandes cantidades de Fe_3C . Una superficie fracturada de este material aparece blanca y de ahí su nombre. Se usa un grupo de hierros blancos altamente aleados por su dureza y resistencia al

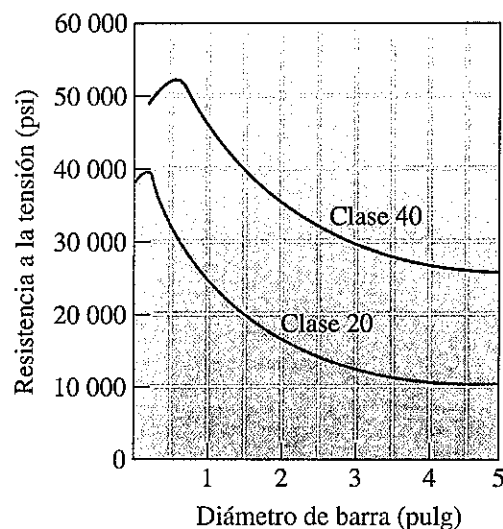


Figura 13-34

Efecto de la rapidez de enfriamiento o tamaño de una pieza colada en las propiedades de tensión de dos piezas de hierro fundido gris.

desgaste abrasivo. Elementos tales como el cromo, níquel y molibdeno se agregan para que, además de los carburos de aleación formados durante la solidificación, se forme martensita durante un tratamiento térmico subsiguiente.

La **fundición maleable** formada por el tratamiento térmico del hierro fundido blanco, produce agrupamientos redondeados de grafito. Tiene mejor ductilidad que las fundiciones de hierro grises o blancas. También presenta muy buena facilidad para ser maquinado. El hierro maleable se produce por tratamiento térmico del hierro blanco no aleado y 3% de carbono equivalente (2.5% de C, 1.5% de Si). Durante el tratamiento térmico, se descompone la cementita formada durante la solidificación y se producen bloques, o nódulos. A veces, los nódulos, o carbono de revenido, se asemejan a palomitas de maíz. La forma redondeada del grafito permite una buena combinación de resistencia y ductilidad. La producción de hierro maleable requiere de varios pasos (figura 13-35). Se forman núcleos de nódulos de grafito cuando se calienta lentamente hierro blanco. Durante la **primera etapa de grafitización (PEG)**, se descompone la cementita en austenita estable y en fases de grafito cuando el carbono del Fe_3C se difunde en los núcleos de grafito. A continuación de la PEG, la austenita se transforma durante el enfriamiento. La figura 13-36 muestra la microestructura del hierro blanco original (a) y los

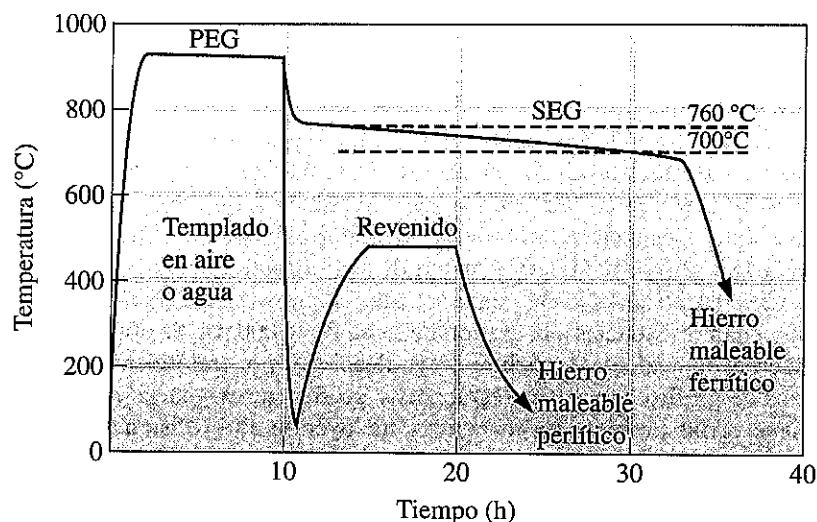


Figura 13-35 Tratamientos térmicos para hierros maleables ferríticos y perlíticos.

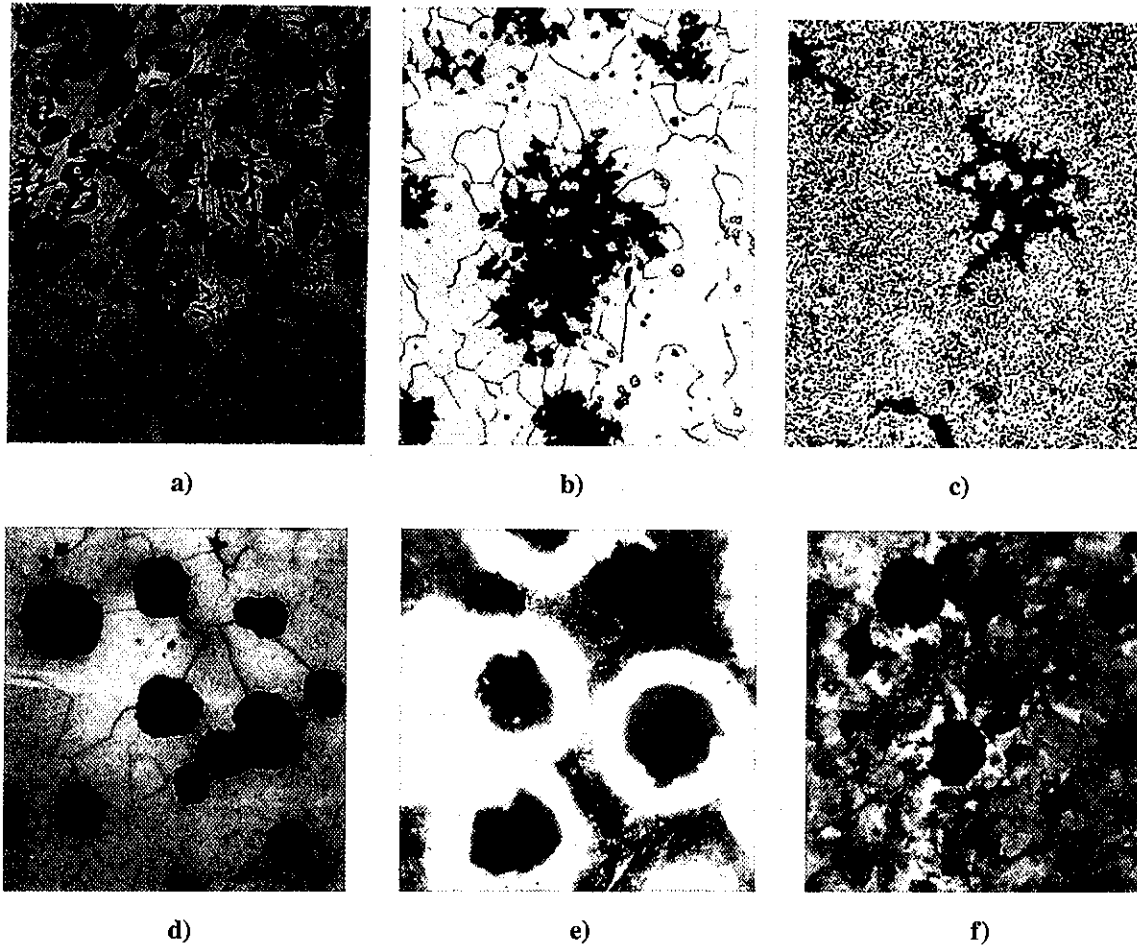


Figura 13-36 a) Hierro fundido blanco antes de tratamiento térmico (100×). b) Hierro maleable ferrítico con nódulos de grafito y pequeñas inclusiones de MnS en una matriz de ferrita (200×). c) Hierro maleable perlítico revenido para producir una matriz de martensita revenida (500×). (Las imágenes b) y c) son del *Metals Handbook*, vols. 7 y 8 (1972, 1973), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.) d) Hierro dúctil recocido con una matriz de ferrita (250×). e) Hierro dúctil fundido con una matriz de ferrita (blanca) y perlita (250×). f) Hierro dúctil normalizado con una matriz de perlita (250×). (Las imágenes a), d), e) y f) se reimprimen por cortesía de Don Askeland.)

dos tipos de hierro maleable que se pueden producir (b y c). Para hacer *hierro maleable ferrítico*, la pieza colada se enfría lentamente en toda la escala de temperatura eutectoide para producir una **segunda etapa de grafitización** (SEG). El hierro maleable ferrítico tiene buena tenacidad comparada con la de otros hierros, porque su equivalente de carbono bajo reduce la temperatura de transición por debajo de la temperatura ambiente. El *hierro maleable perlítico* se obtiene cuando la austenita se enfría al aire o en aceite para formar perlita o martensita. En cualquier caso, la matriz es dura y quebradiza. El hierro se reviene entonces a una temperatura por debajo de la eutectoide. El **revenido** es un tratamiento térmico que reviene la martensita o esferoidiza la perlita. Una temperatura más alta de revenido disminuye la resistencia y aumenta la ductilidad y tenacidad.

El **hierro fundido dúctil o nodular** contiene partículas esferoidales de grafito. El hierro dúctil se produce por tratamiento del hierro líquido con un carbono equivalente de cerca de 4.3% con magnesio, lo cual hace crecer el grafito esferoidal (llamados nódulos) durante la solidificación, en lugar de durante el prolongado tratamiento térmico. Se requieren de varios pasos para producir este hierro. Estos pasos incluyen la desulfuración, **nodulación** e inoculación. En la desulfuración, cualquier azufre y oxígeno en el metal líquido es eliminado al agregar

agentes desulfurizantes como el óxido de calcio (CaO). En la nodulación, se agrega Mg, por lo general en forma diluida como en una aleación de MgFeSi. Si se agrega Mg puro, la reacción de formación de nódulos es muy violenta porque el punto de fusión del Mg es mucho menor que la temperatura del hierro líquido, y casi todo el Mg se perderá. Un residuo de alrededor de 0.03% de Mg debe estar en el hierro líquido después del tratamiento para que crezca el grafito esferoidal. Por último, es esencial la **inoculación** con compuestos de FeSi para causar nucleación heterogénea del grafito; si la inoculación no es efectiva, se formará hierro blanco en lugar de hierro dúctil. El hierro nodulizado y el inoculado debe entonces vaciarse en moldes después de muy pocos minutos para evitar su degradación. La **degradación** ocurre por la gradual y no violenta pérdida de Mg debida a la vaporización y/o reacción con oxígeno, que resulta en grafito en escamas o compactado en lugar de grafito esferoidal. Además, el efecto inoculante también se degrada, lo cual resulta en un hierro blanco.

En comparación con el hierro gris, el hierro fundido dúctil tiene excelente resistencia y ductilidad. Debido al mayor contenido de silicio (por lo general alrededor de 2.4%) en hierros dúctiles en comparación con 1.5% de Si en hierros maleables, los hierros dúctiles son más fuertes pero no tan tenaces como los hierros maleables.

El **hierro fundido con grafito compactado** contiene grafito compactado pero interconectado, también producido durante solidificación. La forma del grafito en el hierro fundido, con grafito compactado, es intermedia entre escamas y esferas con numerosas barras redondas de grafito interconectadas al núcleo de la celda eutéctica. Este grafito compactado, a veces llamado **grafito vermicular**, también se forma cuando el hierro dúctil se degrada. El grafito compactado permite obtener características de resistencia y ductilidad que superan a las del hierro fundido gris, pero permiten que el hierro retenga propiedades de buena conductividad térmica y amortiguamiento de vibraciones. El tratamiento para el hierro con grafito compactado es similar al del hierro dúctil, pero sólo 0.015% de Mg se introduce durante la formación de nódulos. Se agrega una pequeña cantidad de titanio (Ti) para asegurar la formación del grafito compactado.

Las propiedades comunes de los hierros colados se dan en la tabla 13-5.

TABLA 13-5 ■ Propiedades comunes de los hierros colados

	Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia a la fluencia (psi)	% de elongación	Notas
Hierros grises				
Clase 20	12 000-40 000	—	—	
Clase 40	28 000-54 000	—	—	
Clase 60	44 000-66 000	—	—	
Hierros maleables				
32510	50 000	32 500	10	Ferrítico
35018	53 000	35 000	18	Ferrítico
50005	70 000	50 000	5	Perlítico
70003	85 000	70 000	3	Perlítico
90001	105 000	90 000	1	Perlítico
Hierros dúctiles				
60-40-18	60 000	40 000	18	Recocido
65-45-12	65 000	45 000	12	Ferrítico sin tratamiento
80-55-06	80 000	55 000	6	Perlítico sin tratamiento
100-70-03	100 000	70 000	3	Normalizado
120-90-02	120 000	90 000	2	Templado y revenido
Hierros con grafito compactado				
Baja resistencia	40 000	28 000	5	90% ferrítico
Alta resistencia	65 000	55 000	1	80% perlítico

Resumen

- Las propiedades de los aceros, determinadas por endurecimiento por dispersión, dependen de la cantidad, tamaño, forma y distribución de la cementita. Estos factores son controlados por aleaciones y tratamientos térmicos.
- Un recocido de proceso recristaliza los aceros trabajados en frío.
- La esferoidización produce Fe_3C grande, esferoidal y buenas características de maquinado en aceros al alto carbono.
- El recocido, que involucra un enfriamiento lento en horno después de la austenitización, produce una estructura perlítica gruesa que contiene Fe_3C en laminillas.
- La normalización, que involucra un enfriamiento al aire después de la austenitización, produce una estructura perlítica fina y resistencia más alta en comparación con el recocido.
- En un recocido isotérmico, se obtiene perlita con una separación interlaminar uniforme al transformar la austenita a una temperatura constante.
- El austemperizado se usa para producir bainita, que contiene Fe_3C redondeado, por una transformación isotérmica.
- Los tratamientos térmicos de templado y revenido requieren la formación y descomposición de la martensita, lo que produce dispersiones excepcionalmente finas de Fe_3C redondo.
- Se pueden entender mejor los tratamientos térmicos mediante el uso de diagramas TTT, diagramas TEC y curvas de templabilidad.
- Los diagramas TTT describen cómo se transforma la austenita en perlita y bainita a una temperatura constante.
- Los diagramas TEC describen cómo se transforma la austenita durante un enfriamiento continuo. Estos diagramas dan las magnitudes de enfriamiento necesarias para obtener martensita en tratamientos de templado y revenido.
- Las curvas de templabilidad comparan la facilidad con la cual diferentes aceros se transforman en martensita.
- Los elementos de aleación aumentan los tiempos necesarios para las transformaciones en los diagramas TTT, reducen las magnitudes de rapidez de enfriamiento necesario para producir martensita en los diagramas TEC, y mejoran la templabilidad del acero.
- Los aceros y tratamientos térmicos especiales producen propiedades únicas o combinaciones de propiedades. De particular importancia son los tratamientos para endurecimiento superficial, tales como el carburizado, que producen una excelente combinación de resistencia a la fatiga e impactos. Los aceros inoxidable, que contienen un mínimo de 11% de Cr, tienen excelente resistencia a la corrosión.
- Los hierros colados, por definición, experimentan una reacción eutéctica durante su solidificación. Dependiendo de la composición y tratamiento, se forman ya sea γ y Fe_3C o γ y grafito durante la solidificación.

Glosario

Acero inoxidable dúplex Es una clase especial de aceros inoxidables que contiene una microestructura de ferrita y austenita.

Aceros martensíticos envejecibles Es una clase especial de aceros aleados que obtienen altas resistencias mediante una combinación de las reacciones martensítica y de endurecimiento por envejecimiento.

Aceros de fase dual Aceros especiales tratados para producir martensita dispersa en una matriz de ferrita.

Aceros inoxidables Grupo de aleaciones ferrosas que contienen al menos 11% de Cr, que proporciona extraordinaria resistencia a la corrosión.

Aceros para herramienta Grupo de aceros al alto carbono que produce combinaciones de alta dureza, tenacidad y resistencia a temperaturas elevadas.

Aceros sin intersticios Éstos son aceros que contienen Nb y Ti. Reaccionan con C y S para formar precipitados de carburos y sulfuros, dejando la ferrita casi sin elementos intersticiales.

Aceros TRIP Grupo de aceros con microestructura formada por una matriz continua de ferrita, una segunda fase más dura (martensita y/o bainita), y austenita retenida. TRIP (por sus siglas en inglés: TRansformation Induced Plasticity, es decir, plasticidad inducida por transformación).

Arrabio Hierro fundido producido en un alto horno, también conocido como metal caliente. Contiene aproximadamente 95% de hierro, 4% de carbono, 0.3-0.9% de silicio, 0.5% de manganeso y 0.025-0.05% de azufre, fósforo y titanio.

Austenita retenida Austenita que no puede transformarse en martensita durante el templado debido a la expansión de volumen asociada con la reacción.

Austenitización Calentamiento de un acero o hierro fundido a una temperatura a la que se puede formar austenita homogénea. La austenitización es el primer paso en la mayor parte de los tratamientos térmicos para aceros y hierros fundidos.

Carbonitruración Endurecimiento de la superficie de acero con carbono y nitrógeno obtenidos a partir de una atmósfera especial de gas.

Carburizado Grupo de técnicas para endurecimiento de superficies por medio de las que el carbono se difunde en el acero.

Celda eutéctica Agrupamiento de hojuelas de grafito producido durante la solidificación de hierro gris que están todas interconectadas a un núcleo común.

Cianuración Endurecimiento de la superficie del acero con carbono y nitrógeno obtenido de un baño de solución líquida de cianuro.

Curvas de templabilidad Gráficas que muestran el efecto de la rapidez de enfriamiento en la dureza del acero templado.

Deformación de la austenita metaestable Tratamiento térmico termomecánico en el que la austenita se deforma plásticamente por debajo de la temperatura A_1 , y a continuación se puede transformar en bainita o martensita.

Degradación Pérdida de formación de nódulos o del efecto inoculador en hierros colados como función del tiempo, que permite cambios indeseables en la microestructura y propiedades.

Distancia Jominy Distancia desde el extremo templado de una barra de Jominy. La distancia Jominy está relacionada con la rapidez de enfriamiento.

Equivalente de carbono (EC) Carbono más un tercio del silicio en un hierro fundido.

Esferoidita Microconstituyente que contiene partículas gruesas de cementita esférica en una matriz de ferrita, permitiendo obtener excelentes características de maquinado en aceros al alto carbono.

Grafito vermicular Grafito interconectado, redondeado, que se forma durante la solidificación de hierro fundido. Ésta es la forma deseada en el hierro compactado con grafito, pero es una forma defectuosa en el hierro dúctil.

Grietas por templado Grietas que se forman en la superficie de un acero durante el templado, debido a esfuerzos residuales de tensión que se producen por el cambio de volumen que acompaña a la transformación de austenita en martensita.

Hierro fundido Aleación ferrosa que contiene suficiente carbono para que ocurra una reacción eutéctica durante la solidificación.

Hierro fundido blanco Hierro fundido que produce cementita en lugar de grafito durante la solidificación. Los hierros blancos son duros y quebradizos.

Hierro fundido con grafito compactado Hierro fundido tratado con pequeñas cantidades de magnesio y titanio, para que el grafito crezca durante la solidificación como precipitado interconectado, en forma de coral, dando propiedades intermedias entre las del hierro gris y dúctil.

Hierro fundido dúctil Hierro fundido tratado con magnesio para que el grafito se precipite durante la solidificación como esferas, permitiendo obtener excelente resistencia y ductilidad. (También se conoce como hierro fundido *nodular*.)

Hierro fundido gris Hierro fundido que durante la solidificación contiene hojuelas de grafito, causando baja resistencia y mala ductilidad. Es el tipo de hierro fundido de más uso.

Hierro fundido maleable Hierro fundido obtenido por medio de un tratamiento térmico prolongado, durante el cual la cementita se descompone para producir grupos redondeados de grafito. Se obtienen buena resistencia, ductilidad y tenacidad como resultado de esta estructura.

Horno de arco eléctrico Horno que se emplea para fundir chatarra de acero usando electricidad. A veces se hacen aceros especiales usando hornos de arco eléctrico.

Inoculación Adición de un agente al hierro fundido, que produce lugares de formación de núcleos en los que el grafito se precipita durante la solidificación.

Martensita revenida Microconstituyente de ferrita y cementita que se forma cuando se reviene la martensita.

Metal caliente Hierro fundido, producido en un alto horno, también conocido como arrabio. Contiene aproximadamente 95% de hierro, 4% de carbono, 0.3-0.9% de silicio, 0.5% de manganeso y 0.025-0.05% de azufre, fósforo y titanio.

Nitruración Endurecimiento de la superficie del acero con nitrógeno obtenido a partir de una atmósfera especial gaseosa.

Modulación Adición de magnesio al hierro fundido, para que el grafito se precipite como esferas en lugar de escamas durante la solidificación.

Normalizado Tratamiento térmico sencillo obtenido al austenitizar y enfriar al aire para producir una estructura perlítica fina. Esto puede hacerse en aceros y hierros fundidos.

Pico de endurecimiento secundario Dureza inusualmente alta en acero revenido a alta temperatura, causada por la precipitación de carburos de aleación.

Primera etapa de grafitización (PEG) Primer paso en el tratamiento térmico de un hierro maleable, durante el cual los carburos formados durante la solidificación se descomponen en grafito y austenita.

Profundidad de cementado Es la profundidad bajo la superficie de un acero a la que ocurre endurecimiento por medio de procesos de endurecimiento y carburizado de la superficie.

Prueba de Jominy Prueba utilizada para evaluar la templabilidad. Una barra de acero austenitizado se temple sólo en un extremo, produciendo así una escala de magnitudes de enfriamiento a lo largo de la barra.

Recocido [acero] Tratamiento térmico empleado para producir perlita gruesa y blanda en el acero por austenitización, y posterior enfriamiento en horno.

Recocido [hierro fundido] Tratamiento térmico empleado para producir una matriz de ferrita en un hierro fundido, por la transformación de la austenita mediante enfriamiento en horno.

Recocido de proceso Tratamiento térmico a baja temperatura empleado para eliminar todo o parte del efecto del trabajo en frío en aceros.

Recocido isotérmico Tratamiento térmico de un acero por austenitización, enfriando rápidamente a una temperatura entre A_1 y la nariz de la curva TTT, y manteniendo así hasta que la austenita se transforme en perlita.

Revenido Recalentamiento de un hierro maleable para reducir la cantidad de carbono combinado como cementita, por esferoidización de perlita, revenido de martensita o grafitización de ambas.

Revenido en la fase austenítica Tratamiento térmico isotérmico por el cual la austenita se transforma en bainita.

Segunda etapa de grafitización [GSE] Segundo paso en el tratamiento térmico de hierros maleables que han de tener una matriz ferrítica. El hierro se enfría lentamente desde la temperatura de la primera etapa de grafitización, de modo que la austenita se transforma en ferrita y grafito en lugar de en perlita.

Sensitización Cuando se calientan a una temperatura de $\sim 480-860^\circ\text{C}$, los carburos de cromo se precipitan a lo largo de los límites de grano en lugar de dentro de granos, causando agotamiento de cromo en el interior. Esto causa que el acero inoxidable se corroa muy fácilmente.

Templabilidad Es la facilidad con la que un acero puede ser templado para formar martensita. Los aceros con alta templabilidad forman martensita incluso en enfriamiento lento.

Templado arriba de M_s Templar austenita a una temperatura apenas arriba de la M_s , y manteniendo así hasta que la temperatura se iguale en todo el acero, antes de enfriar más para producir martensita. Este proceso reduce esfuerzos residuales y grietas por templado. (También conocido como *templado martensítico ininterrumpido*.)

Problemas

Sección 13-1 Designaciones y clasificación de aceros

- 13-1** ¿Cuál es la diferencia entre hierro colado y aceros?
- 13-2** ¿A qué se refieren las temperaturas A_1 , A_3 y A_{cm} ? ¿Estas temperaturas son constantes?
- 13-3** Calcule las cantidades de ferrita, cementita, microconstituyente primario y perlita en los siguientes aceros:
- 1015
 - 1035
 - 1095
 - 10130
- 13-4** Estime el número AISI-SAE para aceros que tengan las siguientes microestructuras:
- 38% de perlita-62% de ferrita primaria
 - 93% de perlita-7% de cementita primaria
 - 97% de ferrita-3% de cementita
 - 86% de ferrita-14% de cementita
- 13-5** ¿Qué significan los términos acero al bajo, medio y alto carbono?
- 13-6** Dos muestras de acero contienen 93% de perlita. Estime el contenido de carbono de cada muestra si se sabe que una es hipoeutectoide y la otra hipereutectoide.

Sección 13-2 Tratamientos térmicos simples

Sección 13-3 Tratamientos térmicos isotérmicos

- 13-7** Explique los siguientes tratamientos térmicos: a) recocido de proceso, b) austenitización, c) recocido, d) normalización y e) templado.
- 13-8** Complete la siguiente tabla:

	1035 Aero	10115 Acero
Temperatura A_1		
Temperatura A_3 o A_{cm}		
Temperatura de recocido completo		
Temperatura de normalización		
Temperatura de recocido de proceso		
Temperatura de esferoidización		

- 13-9** Explique por qué, estrictamente hablando, se pueden usar diagramas TTT sólo para tratamientos isotérmicos.

- 13-10** Determine las constantes c y n en la relación de Avrami (ecuación 12-2), para la transformación de la austenita en perlita para un acero 1050. Suponga que el material ha sido sometido a un tratamiento térmico isotérmico a 600 °C y trace una gráfica log-log de f contra t dada la siguiente información:

$$f = 0.2 \text{ a } t = 2 \text{ s;}$$

$$f = 0.5 \text{ a } t = 4 \text{ s, y}$$

$$f = 0.8 \text{ a } t = 7 \text{ s.}$$

- 13-11** En un acero 1080 perlítico, las laminillas de cementita miden 4×10^{-5} cm de grueso, y las laminillas de ferrita miden 14×10^{-5} cm de grueso. En un acero 1080 esferoidizado, las esferas de cementita miden 4×10^{-3} cm de diámetro. Estime el área total de la interfaz entre la ferrita y la cementita en un centímetro cúbico de cada acero. Determine el porcentaje de reducción en área superficial cuando el acero perlítico se esferoidiza. La densidad de la ferrita es de 7.87 g/cm³ y la de la cementita es de 7.66 g/cm³.

- 13-12** Describa la microestructura presente en un acero 1050 después de cada paso en los siguientes tratamientos térmicos:

- calentar a 820 °C, templar a 650 °C y mantener así 90 s, y templar a 25 °C;
- calentar a 820 °C, templar a 450 °C y mantener así 90 s, y templar a 25 °C;
- calentar a 820 °C, y templar a 25 °C;
- calentar a 820 °C, templar a 720 °C y mantener así 100 s, y templar a 25 °C;
- calentar a 820 °C, templar a 720 °C y mantener así 100 s, templar a 400 °C y mantener así 500 s, y templar a 25 °C;
- calentar a 820 °C, templar a 720 °C y mantener así 100 s, templar a 400 °C y mantener así 10 s, y templar a 25 °C, y
- calentar a 820 °C, templar a 25 °C, calentar a 500 °C mantener así 10³ s, y enfriar al aire a 25 °C.

13-13 Describa la microestructura presente en un acero 10110 después de cada paso en los siguientes tratamientos térmicos:

- calentar a 900 °C, templar a 400 °C, mantener así 10³ s y templar a 25 °C;
- calentar a 900 °C, templar a 600 °C, mantener así 50 s y templar a 25 °C;
- calentar a 900 °C y templar a 25 °C;
- calentar a 900 °C, templar a 300 °C, mantener así 200 s y templar a 25 °C;
- calentar a 900 °C, templar a 675 °C, mantener así 1 s y templar a 25 °C;
- calentar a 900 °C, templar a 675 °C, mantener así 1 s, templar a 400 °C y mantener así 900 s, y enfriar lentamente a 25 °C;
- calentar a 900 °C, templar a 675 °C, mantener así 1 s, templar a 300 °C y mantener así 10³ s, y enfriar al aire a 25 °C, y
- calentar a 900 °C, templar a 300 °C, mantener así 100 s, templar a 25 °C y calentar a 450 °C durante 3600 s, y enfriar a 25 °C.

13-14 Recomiende tratamientos térmicos isotérmicos apropiados para obtener lo siguiente, incluyendo temperaturas y tiempos apropiados:

- un acero 1050 recocido isotérmicamente con DRC 23;
- un acero 10110 recocido isotérmicamente con DRC 40;
- un acero 1080 recocido isotérmicamente con DRC 38;
- un acero 1050 austemplado con DRC 40;
- un acero 10110 austemplado con DRC 55, y
- un acero 1080 austemplado con DRC 50.

13-15 Compare los tiempos mínimos requeridos para recocer isotérmicamente los siguientes aceros a 600 °C. Discuta el efecto del contenido de carbono del acero en la cinética de formación de núcleos y crecimiento durante el tratamiento térmico.

- 1050
- 1080
- 10110

Sección 13-4 Tratamientos térmicos de templado y revenido

13-16 Explique los siguientes términos: a) templado, b) revenido, c) austenita retenida y d) temple arriba de M_s /temple martensítico ininterrumpido.

13-17 Los medios comunes empleados para templar incluyen aire, salmuera (10% de sal en agua), agua y aceites diversos.

- Clasifique los cuatro medios en orden de rapidez de enfriamiento del más rápido al más lento.
- Describa una situación cuando templar al aire sería indeseable.
- Durante el templado en medios líquidos, por lo general se agita ya sea la pieza que está siendo enfriada o el baño. Explique por qué.

13-18 Se desea producir un acero 1050 que tenga una dureza Brinell de al menos 330 y una elongación de al menos 15%.

- Recomiende un tratamiento térmico, incluyendo temperaturas apropiadas, que permita lograr esto. Determine que la resistencia a la fluencia y resistencia a la tensión que se obtienen con este tratamiento térmico.
- ¿Qué resistencia a la fluencia y resistencia a la tensión se obtendrían en un acero 1080 usando el mismo tratamiento térmico? Véase la figura 12-27.
- ¿Qué resistencia a la fluencia, resistencia a la tensión y porcentaje de elongación se obtendrían en el acero 1050 si éste fuera normalizado? Véase la figura 13-4.

13-19 Se desea producir un acero 1050 que tenga una resistencia a la tensión de al menos 175 000 psi y una reducción en área de al menos 50%.

- Recomiende un tratamiento térmico, incluyendo temperaturas apropiadas, que permita lograr esto. Determine el número de dureza Brinell, el porcentaje de elongación y la resistencia a la fluencia que se obtienen por este tratamiento térmico.
- ¿Qué resistencia a la fluencia y resistencia a la tensión se obtendrían en un acero 1080 usando el mismo tratamiento térmico?
- ¿Qué resistencia a la fluencia, resistencia a la tensión y porcentaje de elongación se obtendrían en el acero 1050 si fuera recocido?

13-26 Se ha encontrado que un acero 1070, cuando se austenitiza a 750 °C, forma una estructura que contiene perlita y una pequeña cantidad de ferrita en los límites de granos que da

resistencia y ductilidad aceptables. ¿Qué cambios en la microestructura, si los hay, se esperarían si el acero 1070 contuviera un elemento de aleación como el Mo o Cr? Explique.

13-27 Usando los diagramas TTT, compare las capacidades de templabilidad de aceros 4340 y 1050, mediante la determinación de los tiempos necesarios para que ocurra la transformación isotérmica de la ferrita y la perlita (F_s , P_s y P_f) a 650 °C.

13-28 Se desea obtener una dureza de DRC 38 a 40 en un acero templado. ¿Qué intervalo de rapidez de enfriamiento se tendría que obtener para los siguientes aceros? ¿Algunos aceros son inapropiados?

- a) 4340
- b) 8640
- c) 9310
- d) 4320
- e) 1050
- f) 1080

13-29 Una pieza de acero debe tener una dureza después del templado de DRC 35 para evitar velocidades de desgaste excesivas durante su uso. Cuando la pieza se fabrica con acero 4320, la dureza es de sólo DRC 32. Determine la dureza si la pieza se hiciera bajo condiciones idénticas, pero con los siguientes aceros. ¿Cuáles de estos aceros, si los hay, serían mejores opciones que el 4320?

- a) 4340
- b) 8640
- c) 9310
- d) 1050
- e) 1080

13-30 Una pieza producida de acero 4320 tiene una dureza de DRC 35 en un punto crítico después de templarla. Determine

- a) la rapidez de enfriamiento en ese lugar, y
- b) la microestructura y dureza que se obtendrían si la pieza se hiciera de acero 1080.

13-31 Un acero 1080 se enfría con la mayor rapidez posible que todavía permita que se forme sólo la perlita. ¿Cuál es la rapidez de enfriamiento? ¿Qué distancia Jominy y dureza se esperan para esta rapidez de enfriamiento?

13-32 Determine la dureza y microestructura en el centro de una barra de acero 1080 de 1.5 pulg de diámetro producida al templarla en

- a) aceite sin agitación;
- b) agua sin agitación, y
- c) salmuera con agitación.

13-33 Una barra de acero 4320 de 2 pulg de diámetro ha de tener una dureza de al menos DRC 35. ¿Cuál es la mínima severidad del templado (coeficiente D)? ¿Qué tipo de medio para templado recomendaría usted para producir la dureza deseada, con la mínima probabilidad de agrietamiento por templado?

13-34 Una barra de acero se ha de temprar en agua con agitación. Determine el diámetro máximo de la barra que producirá una dureza mínima de DRC 40 si la barra es de cero

- a) 1050
- b) 1080
- c) 4320
- d) 8640
- e) 4340

13-35 El centro de una barra de 1 pulg de diámetro de acero 4320 tiene una dureza de DRC 40. Determine la dureza y microestructura en el centro de una barra de 2 pulg de acero 1050 templado en el mismo medio.

Sección 13-7 Aceros especiales

Sección 13-8 Tratamientos superficiales

Sección 13-9 Soldabilidad del acero

13-36 ¿Cuál es el principio del endurecimiento superficial de los aceros usando carburizado y nitruración?

13-37 Se va a carburizar un acero 1010 usando una atmósfera de gas que produce 1.0% de C en la superficie del acero. La profundidad de cementado se define como la distancia debajo de la superficie que contiene al menos 0.5% de C. Si se carburiza a 1000 °C, determine el tiempo necesario para producir una profundidad de cementado de 0.01 pulgadas. (Repase el capítulo 5.)

13-38 Se va a carburizar un acero 1015 a 1050 °C durante 2 horas usando una atmósfera gaseosa que produce 1.2% de C en la superficie del acero. Grafique el porcentaje de carbono

contra la distancia desde la superficie del acero. Si éste se enfría lentamente después del carburizado, determine la cantidad de cada fase y de cada microconstituyente a intervalos de 0.002 de pulgada desde la superficie. (Véase el capítulo 5.)

- 13-39** ¿Por qué la resistencia de la zona afectada por el calor es más alta para aceros al bajo carbono? ¿Cuál es la función de la austenita retenida en este caso?
- 13-40** ¿Por qué es fácil soldar aceros al bajo carbono, pero difícil hacerlo en aceros al alto carbono?
- 13-41** Se suelda un acero 1050. Después del enfriamiento, se obtienen durezas en la zona afectada por el calor en varios lugares desde el borde de la zona de fusión. Determine las durezas esperadas en cada punto si un acero 1080 se soldara bajo las mismas condiciones. Estime la microestructura en cada lugar del acero 1080 soldado.

Distancia desde el borde de la zona de fusión	Dureza en soldadura 1050
0.05 mm	DRC 50
0.10 mm	DRC 40
0.15 mm	DRC 32
0.20 mm	DRC 28

Sección 13-10 Aceros inoxidables

- 13-42** ¿Qué es un acero inoxidable? ¿Por qué son inoxidables los aceros inoxidables?
- 13-43** Se desea producir un acero inoxidable martensítico que contenga 17% de Cr. Recomiende un contenido de carbono y temperatura de austenitización que nos permitiría obtener 100% martensita durante el templado. ¿Qué microestructura se produciría si luego la martensita fuera revenida hasta formarse las fases de equilibrio?
- 13-44** De manera ocasional, cuando se suelda un acero inoxidable austenítico, el depósito de soldadura puede ser ligeramente magnético. Con base en el diagrama de fases de Fe-Cr-Ni-C [figura 13-28b)], ¿qué fase esperaría usted que esté causando el comportamiento magnético? ¿Por qué podría haberse formado esta fase? ¿Qué podría hacerse para restablecer el comportamiento no magnético?

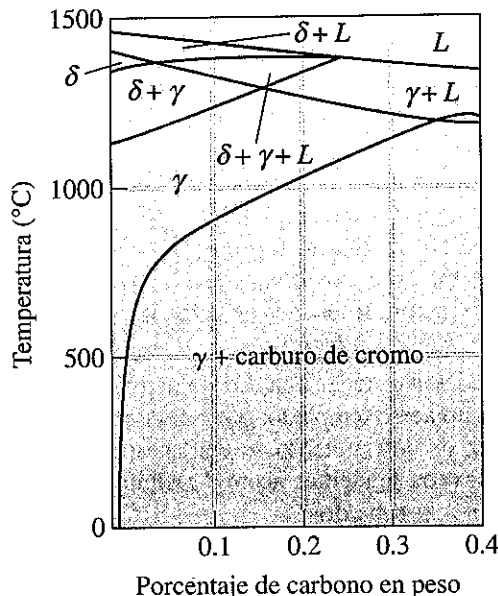


Figura 13-28 (Repetida para el problema 13-44.)
b) Una sección del diagrama de fases de hierro-cromo-níquel-carbono con un contenido constante de 18% de Cr-8% de Ni. A un bajo contenido de carbono, la austenita es estable a temperatura ambiente.

Sección 13-11 Hierros fundidos

- 13-45** Defina el hierro fundido usando el diagrama de fases de Fe-Fe₃C.
- 13-46** Compare las temperaturas eutécticas de un hierro fundido Fe-4.3% C con una aleación Fe-3.6% C-2.1% Si. ¿Cuál aleación se espera que sea más maquinable y por qué?
- 13-47** ¿Cuáles son los diferentes tipos de hierros fundidos? Explique usando un bosquejo.
- 13-48** Se encuentra que una barra de una pieza colada de hierro gris clase 40 tiene una resistencia a la tensión de 50 000 psi. ¿Por qué la resistencia a la tensión es mayor que la dada por el número de clase? ¿Cuál piensa usted que es el diámetro de la barra de prueba?
- 13-49** A usted le gustaría producir una pieza de hierro gris que se solidifique sin austenita primaria o grafito. Si el contenido de carbono del hierro es de 3.5%, ¿qué porcentaje de silicio debe agregarse?



Problemas de diseño

- 13-50** Se desea producir una placa de desgaste de acero de 2 pulg de grueso para una unidad

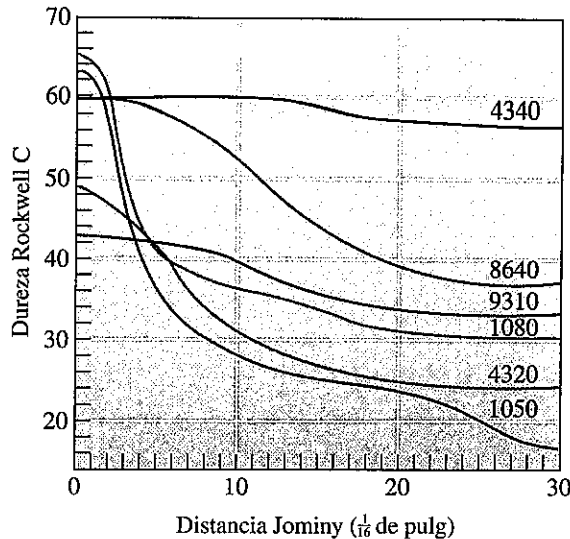


Figura 13-21 (Repetida para el problema 13-50.)
Curvas de templabilidad para varios aceros.

de trituración de roca. Para evitar el frecuente cambio de la placa de desgaste, la dureza debe ser mayor a DRC 38 hasta 0.25 de pulg de la superficie de acero. El centro de la placa debe tener una dureza de no más de DRC 32 para asegurar alguna tenacidad. Sólo se dispone de templado en agua. Diseñe la placa, suponiendo que sólo se dispone de los aceros dados en la figura 13-21.

- 13-51** Se encuentra que un acero 10110 templado y revenido tiene grietas superficiales que provocan que la pieza tratada térmicamente sea rechazada por el cliente. ¿Por qué se formaron las grietas? Diseñe un tratamiento térmico, incluyendo temperaturas y tiempos apropiados, que minimicen estos problemas.
- 13-52** Diseñe un acero resistente a la corrosión para una bomba que transporta helio líquido a 4 K en un imán superconductor.
- 13-53** Diseñe un tratamiento térmico para un gancho hecho de una barra de acero de 1 pulg de diámetro, que tiene una microestructura que contiene una mezcla de ferrita, bainita y martensita después del templado. Estime las propiedades mecánicas de su gancho.
- 13-54** Diseñe un tratamiento de recocido para un acero 1050. Asegúrese de incluir detalles de temperaturas, rapidez de enfriamiento, microestructuras y propiedades.

- 13-55** Diseñe un proceso para producir un eje de acero de 0.5 cm de diámetro que tenga excelente tenacidad, pero también excelente resistencia al desgaste y a la fatiga. La dureza de la superficie debe ser al menos DRC 60, y la dureza a 0.01 cm bajo la superficie debe ser aproximadamente DRC 50. Describa el proceso, incluyendo detalles de la atmósfera para el tratamiento térmico, la composición del acero, temperaturas y tiempo.

Problemas de cómputo

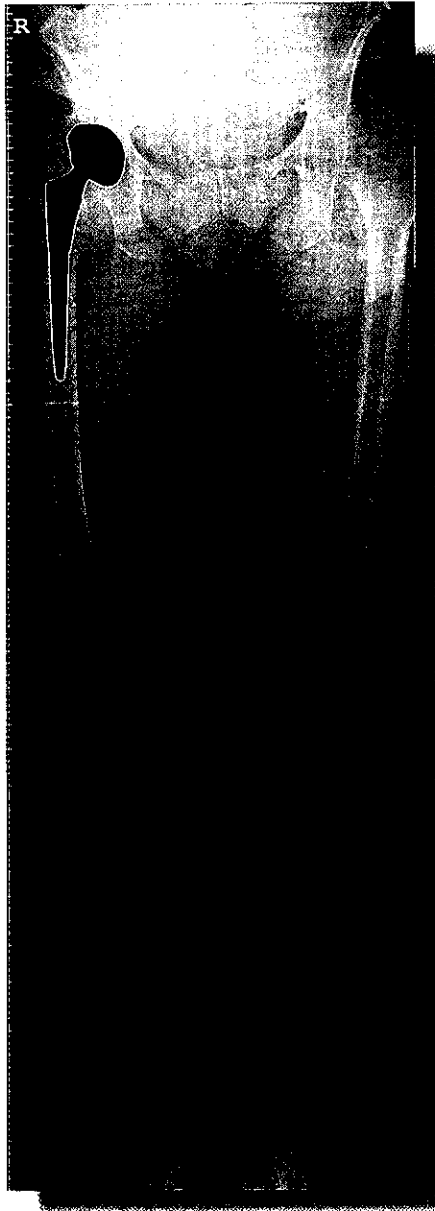
- 13-56** Relaciones empíricas para transformaciones en aceros. Un tratamiento térmico de aceros depende del conocimiento de las temperaturas A_1 , A_3 , A_{cm} , M_s y M_f . Es frecuente que los productores de acero proporcionen a sus clientes las fórmulas empíricas que definen estas temperaturas, como una función de las concentraciones del elemento de aleación. Por ejemplo, una de esas fórmulas descrita en la información del tema es

$$M_s(\text{en } ^\circ\text{C}) = 561 - 474(\% \text{C}) - 33 \\ (\% \text{Mn}) - 17(\% \text{Ni}) \\ - 17(\% \text{Cr}) - 21(\% \text{Mo})$$

Escriba un programa de cómputo que pida al usuario dar información de las concentraciones de diferentes elementos de aleación, así como dar las temperaturas M_s y M_f . Suponga que la temperatura M_f es de 215°C por debajo de M_s .

K Knovel® Problemas

- K13-1** Encuentre un diagrama de tiempo-temperatura-transformación (TTT) para el acero 1340. Suponga que el acero se mantiene a 1330°F durante 1 hora, se temple a 800°F , se mantiene durante 1000 s a esta temperatura y luego se enfría al aire a temperatura ambiente.
- ¿Cuál es la microestructura y dureza del acero después del tratamiento térmico?
 - ¿Cuáles son las designaciones, templabilidad y aplicaciones de este acero?
 - ¿Cuáles son las propiedades mecánicas de este acero entregado como laminado en caliente, normalizado y recocido cuando se revino a 800°F y fue templado en aceite?



© Davitcu | Dreamstime.com



© Skyhawk911 | Dreamstime.com

Cada vez más, se están incorporando implantes artificiales en el cuerpo humano. En el diagrama de la izquierda se ilustra un ejemplo de articulaciones que por lo general son reemplazadas. Cada año, aproximadamente 500 000 personas reciben un implante de cadera como el que se ilustra en la fotografía de la derecha. El implante debe estar hecho de un material biocompatible que tenga una gran resistencia a la fractura y una excelente vida a la fatiga, debe ser resistente a la corrosión y poseer una rigidez similar a la del hueso. Las aleaciones no ferrosas basadas en titanio se usan con frecuencia para esta aplicación, al igual que las aleaciones de cobalto-cromo.

Aleaciones no ferrosas

¿Se ha preguntado alguna vez?

- *En la historia de la humanidad, ¿qué hubo primero: cobre o acero?*
- *¿Por qué la estatua de la libertad tiene una pátina verde?*
- *¿Qué materiales se usan para la manufactura de implantes biomédicos para prótesis de cadera?*
- *¿Por qué se usa tungsteno para filamentos de focos de luz?*
- *¿Por qué son tóxicos algunos metales?*
- *¿Qué materiales se usan como "catalizadores" en el convertidor catalítico de un automóvil? ¿Qué es lo que convierten?*

Las aleaciones no ferrosas (es decir, aleaciones de elementos que no sean de hierro) incluyen, pero no se limitan, a las siguientes aleaciones basadas en aluminio, cobre, níquel, cobalto, zinc, metales preciosos (como Pt, Au, Ag, Pd) y otros metales (por ejemplo Nb, Ta, W). En este capítulo, brevemente se exploran las propiedades y aplicaciones de aleaciones de Cu, Al y Ti en aplicaciones para soportar cargas. No se estudiarán las aplicaciones electrónicas, magnéticas y otras de aleaciones no ferrosas.

En numerosas aplicaciones, el peso es un factor de importancia crítica. Para relacionar la resistencia del material con su peso, se define una **resistencia específica**, o relación entre resistencia y peso:

$$\text{Resistencia específica} = \frac{\text{resistencia}}{\text{densidad}} \quad (14-1)$$

La tabla 14-1 compara la resistencia específica del acero, algunas aleaciones no ferrosas de alta resistencia y compuestos con matriz de polímeros. Otro factor a considerar en el diseño de metales no ferrosos es su costo, que también varía en forma considerable. La tabla 14-1 da el precio aproximado de diferentes materiales, pero hay que observar que los precios de materiales fluctúan con las tendencias económicas globales y que el precio del material es sólo una pequeña parte del costo de una pieza. La fabricación y el acabado, por no decir su distribución y venta, a veces contribuyen mucho más al costo total de una pieza. Los compuestos basados en carbono y otras fibras tienen también ventajas considerables con respecto a su resistencia

TABLA 14-1 ■ Resistencia específica y costo de aleaciones no ferrosas, aceros y compuestos de polímeros

Metal	Densidad		Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia específica (pulg)	Costo por libra (\$) ^b
	g/cm ³	(lb/pulg ³)			
Aluminio	2.70	(0.097)	83 000	8.6×10^5	0.60
Berilio	1.85	(0.067)	55 000	8.2×10^5	350.00
Cobre	8.93	(0.322)	150 000	4.7×10^5	0.71
Plomo	11.36	(0.410)	10 000	0.2×10^5	0.45
Magnesio	1.74	(0.063)	55 000	8.7×10^5	1.50
Níquel	8.90	(0.321)	180 000	5.6×10^5	4.10
Titanio	4.51	(0.163)	160 000	9.8×10^5	4.00
Tungsteno	19.25	(0.695)	150 000	2.2×10^5	4.00
Zinc	7.13	(0.257)	75 000	2.9×10^5	0.40
Aceros	~7.87	(0.284)	200 000	7.0×10^5	0.10
Aramida/epóxico	1.4	(0.05)	200 000	4.0×10^5	—
(Kevlar, fracción de volumen de fibras 0.6, tensión longitudinal)					
Aramida/epóxico	1.4	(0.05)	4300	0.86×10^4	—
(Kevlar, fracción de volumen de fibras 0.6, tensión transversal) ^a					
Vidrio/epóxico	2.1	(0.075)	150 000	2.0×10^6	—
(fracción de volumen de fibras de vidrio E 0.6, tensión longitudinal)					
Vidrio/epóxico	2.1	(0.075)	7 000	9.3×10^4	—
(fracción de volumen de fibras de vidrio E 0.6, tensión transversal)					

^a Datos para compuestos de Harper, C.A., Handbook of Materials Product Design, 3a. ed., 2001: McGraw-Hill. Los compuestos de mercancía son relativamente de poco costo; los compuestos de alto rendimiento son costosos.

^b Costos basados en precios promedio para los años 1998 a 2002.

específica. Sus propiedades son típicamente anisótropas, pero la temperatura a la que se pueden emplear es limitada. En la práctica, para superar la anisotropía, es frecuente que se fabriquen compuestos en muchas capas; las direcciones de fibras se cambian en diferentes capas para reducir al mínimo la anisotropía en las propiedades.

14-1 Aleaciones de aluminio

El aluminio es el tercer elemento más abundante en la naturaleza (después del oxígeno y el silicio), pero, hasta fines del siglo XIX, era costoso y difícil de producir. El remate de seis libras de peso instalado en lo alto del monumento a Washington en 1884 fue una de las piezas de aluminio más grandes hechas en aquel tiempo.

Propiedades y usos generales del aluminio El aluminio tiene una densidad de 2.70 g/cm^3 , o sea un tercio de la densidad del acero, y un módulo de elasticidad de $10 \times 10^6 \text{ psi}$ (70 GPa). Aun cuando las aleaciones de aluminio tienen propiedades a la tensión más bajas que el acero, su resistencia específica (o relación entre resistencia y peso) es excelente. Los hermanos Wright utilizaron una aleación de Al-Cu para su motor por esta razón (capítulo 12). Al aluminio se le puede dar forma con toda facilidad, tiene alta conductividad térmica y eléctrica y no muestra transición de dúctil a quebradizo a bajas temperaturas. No es tóxico y puede ser reciclado con sólo alrededor de 5% de la energía que fue necesaria para hacerlo a partir de la alúmina. Ésta es la razón por la cual el reciclado de aluminio es tan

TABLA 14-2 ■ Efecto de los mecanismos de endurecimiento en aluminio y aleaciones de aluminio

Material	Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia a la fluencia (psi)	% de elongación	Relación de las resistencias entre aleaciones y metal puro
Al puro	6500	2500	60	1
Al comercialmente puro (al menos 99% puro)	13 000	5000	45	2.0
Aleación de Al endurecida por solución sólida	16 000	6000	35	2.4
Al trabajado en frío	24 000	22 000	15	8.8
Aleación de Al endurecida por dispersión	42 000	22 000	35	8.8
Aleación de Al endurecida por envejecimiento	83 000	73 000	11	29.2

exitoso. Las benéficas propiedades físicas del Al incluyen su comportamiento no ferromagnético y resistencia a la oxidación y corrosión. El Al no muestra un verdadero límite de resistencia a la fatiga, sin embargo, de modo que una falla por fatiga puede ocurrir finalmente, incluso a esfuerzos pequeños. Debido a su baja temperatura de fusión, el aluminio no opera bien a temperaturas elevadas. Por último, las aleaciones de aluminio tienen baja dureza, lo cual lleva a baja resistencia al desgaste. El aluminio responde fácilmente a mecanismos de endurecimiento. La tabla 14-2 compara la resistencia del aluminio puro recocido, con la de aleaciones endurecidas por medio de diversas técnicas; las aleaciones pueden ser 30 veces más resistentes que el aluminio puro.

Aproximadamente 25% del aluminio producido hoy en día se usa en la industria del transporte, otro 25% en la manufactura de latas de refrescos y otros envases, alrededor del 15% en construcción, 15% en aplicaciones eléctricas y 20% en otras aplicaciones. Su utilizaron alrededor de 200 libras de aluminio en un auto promedio en Estados Unidos en 2010. El aluminio reacciona con el oxígeno, incluso a temperatura ambiente, para producir una capa extremadamente delgada de óxido de aluminio que protege el metal base contra numerosos ambientes corrosivos (capítulo 23), aunque se debe tener cuidado de no generalizar este comportamiento. Por ejemplo, el polvo de aluminio (debido a su elevada área superficial), cuando está presente en la forma de un oxidante como el perclorato de amonio y óxido de hierro como catalizadores, sirve como combustible sólido para motores impulsores para cohetes (SRB). Estos impulsores usan ~200 000 lb de polvo atomizado de aluminio cada vez que el transbordador espacial despega y puede generar suficiente fuerza para que el transbordador alcance una velocidad de ~3000 millas por hora. Nuevos perfeccionamientos relacionados con el aluminio incluyen la invención de aleaciones de aluminio que contienen concentraciones más altas de Mg para su uso en la fabricación de automóviles. También hay interés en desarrollar procesos que directamente transformarán el aluminio derretido en láminas u otros productos sólidos.

Clasificación Las aleaciones de aluminio pueden ser divididas en dos grupos principales: aleaciones forjadas y fundidas, dependiendo de su método de fabricación. Las **aleaciones forjadas**, que reciben su forma por deformación plástica, tienen composiciones y microestructuras que son considerablemente diferentes de las aleaciones fundidas, reflejando así las distintas necesidades del proceso de manufactura. Dentro de cada grupo principal, es posible dividir las aleaciones en dos subgrupos: aleaciones que pueden recibir tratamiento térmico y las que no pueden recibir este tratamiento.

Las aleaciones de aluminio se designan por el sistema de numeración que se muestra en la tabla 14-3. El primer número especifica los principales elementos de aleación, y los números restantes se refieren a la composición específica de la aleación.

El grado de endurecimiento está dado por la **designación de temple** T o H, dependiendo de si la aleación recibe tratamiento térmico o es endurecida por deformación (tabla 14-4). Otras designaciones indican si la aleación ha sido recocida (O), tratada por solución

TABLA 14-3 ■ Sistema de designación para aleaciones de aluminio

Aleaciones forjadas:

1xxx ^a	Al comercialmente puro (>99% Al)	No endurecible por envejecimiento
2xxx	Al-Cu y Al-Cu-Li	Endurecible por envejecimiento
3xxx	Al-Mn	No endurecible por envejecimiento
4xxx	Al-Si y Al-Mg-Si	Endurecible por envejecimiento si Mg está presente
5xxx	Al-Mg	No endurecible por envejecimiento
6xxx	Al-Mg-Si	Endurecible por envejecimiento
7xxx	Al-Mg-Zn	Endurecible por envejecimiento
8xxx	Al-Li, Sn, Zr, o B	Endurecible por envejecimiento
9xxx	No usada actualmente	

Aleaciones fundidas:

1xx.x. ^b	Al comerciante puro	No endurecible por envejecimiento
2xx.x.	Al-Cu	Endurecible por envejecimiento
3xx.x.	Al-Si-Cu or Al-Mg-Si	Algunas son endurecibles por envejecimiento
4xx.x.	Al-Si	No endurecible por envejecimiento
5xx.x.	Al-Mg	No endurecible por envejecimiento
7xx.x.	Al-Mg-Zn	Endurecible por envejecimiento
8xx.x.	Al-Sn	Endurecible por envejecimiento
9xx.x.	No usada actualmente	

^aEl primer dígito muestra el elemento principal de aleación, el segundo dígito muestra modificación; los últimos dos dígitos muestran el porcentaje decimal de la concentración de Al (p. ej. 1060: será una aleación con 99.6% de Al).

^bEl último dígito indica la forma del producto, 1 o 2 es lingote (depende de la pureza) y 0 para fundición.

TABLA 14-4 ■ Designaciones de temple para aleaciones de aluminio

F	Como se fabricó (trabajada en caliente, forjada, fundida, etcétera)
O	Recocida (en la condición más blanda posible)
H	Trabajada en frío - H1x—sólo trabajada en frío. (La x se refiere a la cantidad de trabajo en frío y endurecimiento.) - H12—trabajo en frío que da resistencia a la tensión en medio entre templados O y H14. - H14—trabajo en frío que da resistencia a la tensión en medio entre templados O y H18. - H16—trabajo en frío que da resistencia a la tensión en medio entre templados H14 y H18. - H18—trabajo en frío que da alrededor de 75% de reducción. - H19—trabajo en frío que da resistencia a la tensión mayor a 2000 psi de la obtenida por el templado H18. - H2x—trabajada en frío y parcialmente recocida. - H3x—trabajada en frío y estabilizada a baja temperatura para impedir endurecimiento por envejecimiento de la estructura.
W	Tratada por solución
T	Endurecido por envejecimiento - T1—enfriada desde la temperatura de fabricación y envejecida naturalmente. - T2—enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y envejecida naturalmente. - T3—tratada por solución, trabajada en frío y envejecida naturalmente. - T4—tratada por solución y envejecida naturalmente. - T5—enfriada desde la temperatura de fabricación y envejecida artificialmente. - T6—tratada por solución y envejecida artificialmente. - T7—tratada por solución y estabilizada por exceso de envejecimiento. - T8—tratada por solución, trabajada en frío y envejecida artificialmente. - T9—tratada por solución, envejecida artificialmente y trabajada en frío. - T10—enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y envejecida artificialmente.

TABLA 14-5 ■ Propiedades de aleaciones típicas de aluminio

Aleación		Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia a la fluencia (psi)	% de elongación	Aplicaciones
Aleaciones forjadas no tratables térmicamente:					
1100-O	>99% Al	13 000	5000	40	Componentes eléctricos, papel aluminio, procesamiento de alimentos, latas de refrescos, usos arquitectónicos, metal de relleno para soldadura, tapas de latas de refrescos, componentes marinos
1100-H18		24 000	22 000	10	
3004-O	1.2% Mn-1.0% Mg	26 000	10 000	25	
3004-H18		41 000	36 000	9	
4043-O	5.2% Si	21 000	10 000	22	
4043-H18		41 000	39 000	1	
5182-O	4.5% Mg	42 000	19 000	25	
5182-H19		61 000	57 000	4	
Aleaciones forjadas tratables térmicamente:					
2024-T4	4.4% Cu	68 000	47 000	20	Ruedas para camiones, fuselajes para aviones, émbolos, canoas, carros de ferrocarril y bastidores de aviones
2090-T6	2.4% Li-2.7% Cu	80 000	75 000	6	
4032-T6	12% Si-1% Mg	55 000	46 000	9	
6061-T6	1% Mg-0.6% Si	45 000	40 000	15	
7075-T6	5.6% Zn-2.5% Mg	83 000	73 000	11	
Aleaciones fundidas:					
201-T6	4.5% Cu	70 000	63 000	7	Carcasas de transmisión, piezas coladas de uso general, conexiones en aviones, carcasas de motor, motores de automóviles, equipo para manejo de alimentos, conexiones marinas
319-F	6% Si-3.5% Cu	27 000	18 000	2	
356-T6	7% Si-0.3% Mg	33 000	24 000	3	
380-F	8.5% Si-3.5% Cu	46 000	23 000	3	
390-F	17% Si-4.5% Cu	41 000	35 000	1	
443-F	5.2% Si (colado en arena)	19 000	8000	8	
	(molde permanente)	23 000	9000	10	
	(fundido a presión)	33 000	16000	9	

(W), o si se usa tal como está fabricada (F). Los números que siguen a la T o H indican la cantidad de endurecimiento por deformación, el tipo exacto de tratamiento térmico u otros aspectos especiales del procesamiento de la aleación. Las aleaciones típicas y sus propiedades están incluidas en la tabla 14-5.

Aleaciones forjadas Las aleaciones forjadas 1xxx, 3xxx, 5xxx y casi todas las 4xxx no se pueden endurecer por envejecimiento. Las aleaciones 1xxx y 3xxx son aleaciones de una sola fase, excepto por la presencia de pequeñas cantidades de inclusiones o compuestos intermetálicos (figura 14-1). Sus propiedades son controladas por el endurecimiento por deformación, endurecimiento por solución sólida y control del tamaño de granos. Debido a que las solubilidades de los elementos de aleación en aluminio son pequeñas a temperatura ambiente, es limitado el grado de endurecimiento por solución sólida. Las aleaciones 5xxx contienen dos fases a temperatura ambiente, es decir, α , una solución sólida de magnesio en aluminio, y Mg_2Al_3 , un compuesto intermetálico duro y quebradizo (figura 14-2). Las aleaciones de aluminio-magnesio son endurecidas por una fina dispersión de Mg_2Al_3 , así como por endurecimiento por deformación, endurecimiento por solución sólida y control del tamaño de granos. Como el Mg_2Al_3 no es coherente, los tratamientos de endurecimiento por envejecimiento no son posibles. La serie 4xxx también contiene dos fases, α y silicio casi puro, β (capítulo 11). Las aleaciones que contienen silicio y magnesio pueden ser endurecidas por envejecimiento al permitir que se precipite el Mg_2Si . Las aleaciones 2xxx, 6xxx y 7xxx son aleaciones que se pueden endurecer por envejecimiento. Aun cuando se obtienen excelentes resistencias específicas para estas aleaciones, es limitada la cantidad de precipitado que se puede formar. Además,

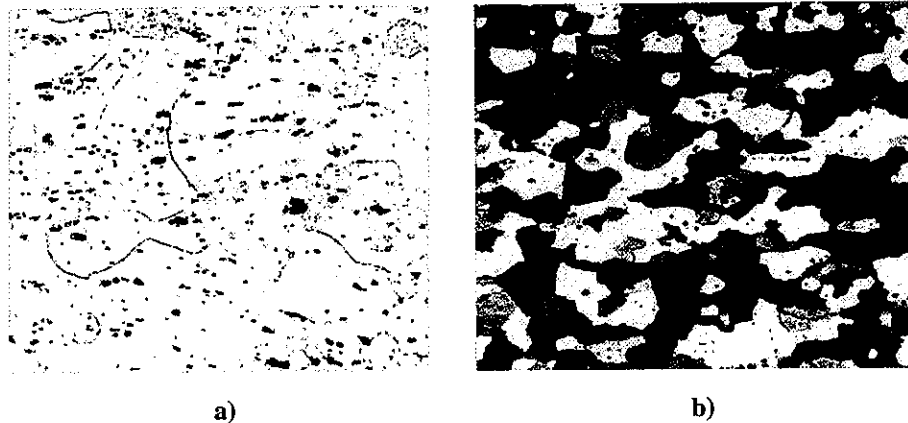


Figura 14-1 a) Inclusiones de FeAl₃ en aluminio 1100 recocido (350×). b) Precipitados de Mg₂Si en aleación de aluminio 5457 recocido (75×). (De ASM Handbook, vol. 7 (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.)

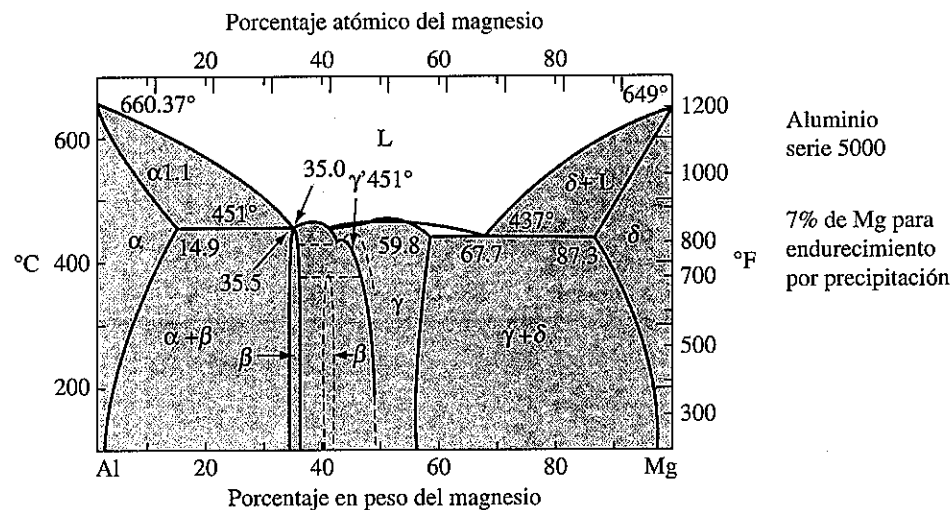


Figura 14-2 Diagrama de fases de aluminio-magnesio. Las líneas discontinuas indican límites inciertos de solubilidad. (American Society for Metals Handbook, 8a. ed., vol. 8, Metallography, Structures and Phase Diagrams. Metals Park, Ohio, 1973, p. 261. Reimpreso con permiso de ASM International.® Todos los derechos reservados. www.asminternational.org.)

no se pueden usar a temperaturas arriba de aproximadamente 175 °C en la condición de envejecidas. La aleación 2024 es la aleación de más uso en aviones. También hay un renovado interés en el desarrollo de aleaciones de Al-Li endurecidas por precipitación debido a su alto módulo de Young y baja densidad; no obstante, los altos costos de procesamiento, propiedades anisótropas y menor tenacidad a fracturas han resultado ser factores limitantes. Se usan aleaciones de Al-Li para hacer tanques de combustible para transbordadores espaciales.

Aleaciones fundidas Muchas de las aleaciones fundidas de aluminio comunes que se ilustran en la tabla 14-5 contienen suficiente silicio para causar la reacción eutéctica, dando a las aleaciones bajos puntos de fusión, buena fluidez y facilidad de moldeo. La **fluidez** es la capacidad del metal líquido para fluir por un molde sin solidificarse prematuramente, y la **facilidad de moldeo** se refiere a la facilidad con la que una buena pieza fundida puede hacerse con la aleación.

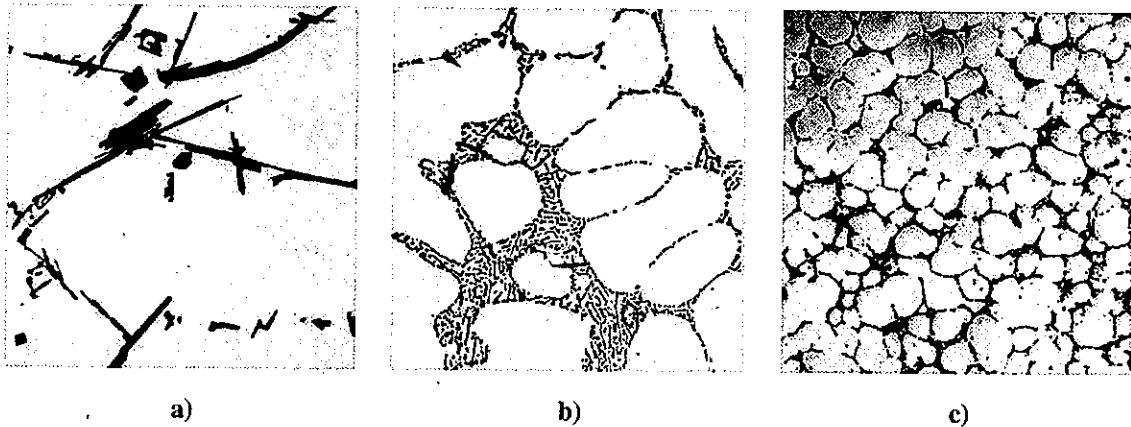


Figura 14-3 a) Aleación de aluminio 443 fundida en arena que contiene silicio grueso e inclusiones. b) Aleación 443 en molde permanente que contiene celdas de dendrita fina y silicio fino debido a un enfriamiento más rápido. c) Aleación 443 colada en matriz con una microestructura todavía más fina (350×). (De ASM Handbook, vol. 7 (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.)

Las propiedades de las aleaciones de aluminio-silicio están controladas por endurecimiento por solución sólida de la matriz α de aluminio, endurecimiento por dispersión por la fase β , y solidificación, que controla el tamaño primario del grano así como la naturaleza del microconstituyente eutéctico. Un rápido enfriamiento obtenido en colada en matriz o fundición en molde permanente (capítulo 9) aumenta la resistencia al refinar el tamaño de grano y el microconstituyente eutéctico (figura 14-3). El refinamiento del grano usando adiciones de boro y titanio, la modificación usando sodio o estroncio para cambiar la estructura eutéctica, y el endurecimiento con fósforo para refinar el silicio primario (capítulo 9) se hacen todos en ciertas aleaciones para mejorar la microestructura y, de esta forma, el grado de endurecimiento por dispersión. Numerosas aleaciones también contienen cobre, magnesio o zinc, permitiendo así el endurecimiento por envejecimiento. Los siguientes ejemplos ilustran aplicaciones de aleaciones de aluminio.

Ejemplo 14-1 Relación entre resistencia y peso en el diseño

Un cable de acero de 0.5 pulg de diámetro tiene una resistencia a la fluencia de 70 000 psi. La densidad del acero es de aproximadamente 7.87 g/cm³. Con base en los datos de la tabla 14-5, determine a) la máxima carga que el cable de acero puede soportar sin que fluya, b) el diámetro de una aleación de aluminio-manganeso trabajada en frío (3004-H18) requerida para sostener la misma carga que el acero y c) el peso por pie del cable de acero contra el cable de aleación de aluminio.

SOLUCIÓN

$$\text{a) Carga} = F = (S_y \times A) = 70\,000 \left(\frac{\pi}{4} \right) (0.5 \text{ pulg})^2 = 13\,745 \text{ lb}$$

b) La resistencia a la fluencia de la aleación de aluminio es de 36 000 psi. Entonces,

$$A = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{F}{S_y} = \frac{13\,745}{36\,000} = 0.382 \text{ pulg}^2$$

$$d = 0.697 \text{ pulg}$$

$$c) \text{ Densidad del acero} = \rho = 7.87 \text{ g/cm}^3 = 0.284 \text{ lb/pulg}^3$$

$$\text{Densidad del aluminio} = \rho = 2.70 \text{ g/cm}^3 = 0.098 \text{ lb/pulg}^3$$

$$\text{Peso del acero} = A\rho = \frac{\pi}{4} (0.5 \text{ pulg})^2 (12)(0.284) = 0.669 \text{ lb}$$

$$\text{Peso del aluminio} = A\rho = \frac{\pi}{4} (0.697)^2 (12)(0.098) = 0.449 \text{ lb}$$

Aun cuando la resistencia a la fluencia del aluminio es menor que la del acero y el cable debe ser de mayor diámetro, el cable de aluminio pesa sólo unos dos tercios del cable de acero. Al comparar materiales, durante el diseño debe incluirse un factor de seguridad apropiado.

Ejemplo 14-2 *Diseño de un proceso para reciclar aluminio*

Diseñe un método para reciclar aleaciones de aluminio empleadas en latas de refrescos.

SOLUCIÓN

Reciclar aluminio es ventajoso porque es necesaria sólo una parte (alrededor del 5%) de la energía requerida para producir aluminio a partir del Al_2O_3 . Sin embargo, reciclar latas de refrescos presenta varias dificultades porque las latas están hechas de dos aleaciones de aluminio (3004 para el cuerpo principal, y 5182 para las tapas) con diferentes composiciones (tabla 14-5). La aleación 3004 tiene la facilidad de formación necesaria para realizar el proceso de embutido profundo; la aleación 5182 es más dura y permite que los dispositivos para abrir las latas funcionen en forma correcta. Cuando las latas se vuelven a fundir, la aleación resultante contiene Mg y Mn y no es apropiada para ninguna de las dos aplicaciones.

Un método para reciclar las latas es separar las dos aleaciones de las latas; éstas se trituran y el producto se calienta para eliminar la laca que ayuda a proteger las latas durante el uso. Se podría entonces triturar de nuevo el material a una temperatura a la que la aleación 5182 empieza a fundirse. La aleación 5182 tiene intervalo de solidificación más amplio que la aleación 3004 y se desmenuza en trozos muy pequeños; la aleación 3004 más dúctil se concentrará en trozos más grandes. Los trozos pequeños de la 5182 pueden, por tanto, separarse al pasar el material por una criba. Las dos aleaciones separadas pueden fundirse entonces, moldearse y laminarse en un nuevo material para latas.

Un método alternativo sería simplemente volver a fundir las latas. Una vez que éstas se hayan vuelto a fundir, se podría inyectar cloro en burbujas por la aleación líquida. El cloro reacciona de manera selectiva con el magnesio, eliminándolo como cloruro. El líquido restante se puede ajustar a la composición apropiada y reciclarse como una aleación 3004.

Ejemplo 14-3 *Selección de diseño, materiales para un tanque criogénico*

Diseñe el material a usar para contener combustible de hidrógeno líquido para el transbordador espacial.

SOLUCIÓN

El hidrógeno líquido se almacena a menos de -253°C ; por tanto, el tanque debe tener buenas propiedades criogénicas. El tanque está sujeto a grandes esfuerzos, en particular cuando el transbordador ingresa a su órbita, y debe tener buena tenacidad a la fractura

para que se reduzcan al mínimo las probabilidades de una falla catastrófica. Por último, debe ser de peso ligero para permitir cargas útiles más grandes o menos consumo de combustible.

El aluminio de peso ligero parecería ser una buena opción. El aluminio no muestra transición de dúctil a quebradizo. Por su buena ductilidad, se espera que el aluminio tenga también buena tenacidad a fracturas, en particular cuando la aleación está en la condición de recocido.

Una de las aleaciones de aluminio criogénico más comunes es el 5083-O. Las aleaciones de aluminio-litio también están siendo consideradas para aplicaciones a baja temperatura para aprovechar su densidad que es incluso más baja.

14-2 Aleaciones de magnesio y berilio

El magnesio, que con frecuencia se extrae electrolíticamente del cloruro de magnesio concentrado en el agua de mar, es más ligero que el aluminio con una densidad de 1.74 g/cm^3 y se funde a una temperatura ligeramente más baja que el aluminio. En muchos ambientes, la resistencia a la corrosión del magnesio se aproxima a la del aluminio, pero la exposición a sales, por ejemplo la que hay cerca de un ambiente marino, les causa rápido deterioro. Aun cuando las aleaciones de magnesio no son tan fuertes como las del aluminio, sus resistencias específicas son comparables. En consecuencia, las aleaciones de magnesio se usan en aplicaciones aeroespaciales, maquinaria de alta velocidad y transportación, así como en equipo para manejo de materiales.

El magnesio, sin embargo, tiene un bajo módulo de elasticidad ($6.5 \times 10^6 \text{ psi}$ o 45 GPa) y mala resistencia a la fatiga, a la termofluencia y al desgaste. El magnesio también presenta un riesgo durante su fundición y maquinado porque se combina fácilmente con el oxígeno y arde. Por último, la respuesta del magnesio a mecanismos de endurecimiento es relativamente baja.

Estructura y propiedades El magnesio, que tiene la estructura CH, es menos dúctil que el aluminio. Las aleaciones tienen cierta ductilidad, ya que la aleación aumenta el número de planos activos de deslizamiento. Puede resultar alguna deformación y endurecimiento por deformación a temperatura ambiente, y las aleaciones pueden deformarse fácilmente a elevadas temperaturas. El endurecimiento por deformación produce un efecto relativamente pequeño en el magnesio puro debido a su bajo coeficiente de endurecimiento por deformación (capítulo 8).

Al igual que en aleaciones de aluminio, la solubilidad de elementos de aleación en magnesio a temperatura ambiente es limitada, causando sólo un pequeño grado de endurecimiento por solución sólida. La solubilidad de muchos elementos de aleación aumenta con la temperatura, como se muestra en el diagrama de fases Mg-Al (figura 14-4). Por tanto, las aleaciones pueden ser endurecidas ya sea por endurecimiento por dispersión o por endurecimiento por envejecimiento. Algunas aleaciones de magnesio endurecidas por envejecimiento, como las que contienen Zr, Th, Ag o Ce, tienen buena resistencia al exceso de envejecimiento a temperaturas de hasta 300°C . Las aleaciones que contienen hasta 9% de Li tienen un peso excepcionalmente ligero. Las propiedades de aleaciones de magnesio comunes aparecen en la tabla 14-6.

Las aleaciones avanzadas de magnesio incluyen las de muy bajos niveles de impurezas y las que contienen grandes cantidades ($>5\%$) de cerio y otros elementos de tierras raras. Estas aleaciones forman una película protectora de MgO que mejora la resistencia a la corrosión. Un proceso rápido de solidificación permite que mayores cantidades de elementos de aleación se disuelvan en el magnesio, con lo cual mejora aun más la resistencia a la corrosión. Pueden obtenerse mejoras en su resistencia, particularmente a altas temperaturas, al introducir partículas de cerámica o fibras tales como el carburo de silicio en el metal.

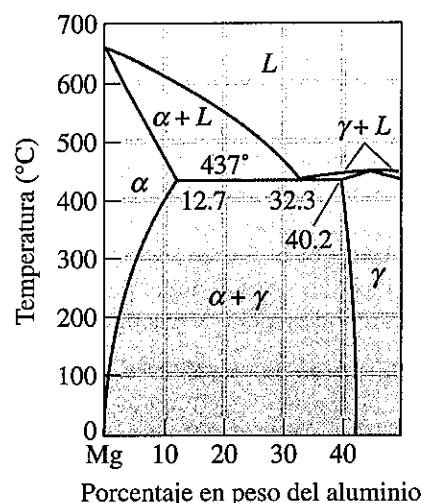


Figura 14-4
Diagrama de fases del magnesio-aluminio.

TABLA 14-6 ■ Propiedades de aleaciones de magnesio comunes

Aleación	Composición	Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia a la fluencia (psi)	% de elongación
Mg puro:				
Recocido		23 000	13 000	3-15
Trabajado en frío		26 000	17 000	2-10
Aleaciones fundidas:				
AM 100-T6	10% Al-0.1% Mn	40 000	22 000	1
AZ81A-T4	7.6% Al-0.7% Zn	40 000	12 000	15
ZK61A-T6	6% Zn-0.7% Zr	45 000	28 000	10
Aleaciones forjadas:				
AZ80A-T5	8.5% Al-0.5% Zn	55 000	40 000	7
ZK40A-T5	4% Zn-0.45% Zr	40 000	37 000	4
HK31A-H24	3% Th-0.6% Zr	38 000	30 000	8

El berilio es más ligero que el aluminio, con una densidad de 1.848 g/cm^3 , pero es más rígido que el acero, con un módulo de elasticidad de $42 \times 10^6 \text{ psi}$ (290 GPa). Las aleaciones de berilio, que tienen resistencias a la fluencia (límite elástico) de 30 000 a 50 000 psi (200-350 MPa), tienen resistencias específicas altas y mantienen su resistencia y rigidez a altas temperaturas. El berilio grado instrumental se utiliza en sistemas de guía por inercia, donde la deformación elástica debe ser mínima; los grados estructurales se usan en aplicaciones aeroespaciales; y las aplicaciones nucleares aprovechan la transparencia del berilio a la radiación electromagnética. Desafortunadamente, el berilio es costoso (tabla 14-1), quebradizo, reactivo y tóxico. Su producción es bastante complicada y, por tanto, las aplicaciones del Be son muy limitadas. El óxido de berilio (BeO), que también es tóxico *en forma de polvo*, se usa para hacer cerámica de alta conductividad térmica.

14-3 Aleaciones de cobre

El cobre se presenta en la naturaleza como cobre elemental y fue extraído con éxito a partir de minerales mucho antes que el hierro, ya que las necesarias temperaturas relativamente bajas para su extracción se podían obtener con más facilidad. Por lo general el cobre se produce mediante un proceso pirometalúrgico (alta temperatura). El mineral de cobre con contenido

alto en azufre se concentra y, a continuación, se convierte en un líquido fundido inmiscible que contiene sulfuro de cobre y sulfuro de hierro y se conoce como mata de cobre. Esto se hace en un horno de fusión rápida. En un reactor por separado, conocido como convertidor de cobre, oxígeno introducido a la mata de cobre convierte el sulfuro de hierro en óxido de hierro y el sulfuro de cobre en un cobre impuro llamado **cobre ampollado**, que en seguida se purifica electrolíticamente. Otros métodos para la extracción de cobre incluyen la lixiviación del cobre a partir de minerales con bajo contenido de azufre con un ácido débil, y luego se extrae electrolíticamente el cobre de la solución.

Las aleaciones con base de cobre tienen densidades más altas que los aceros. Aun cuando la resistencia a la fluencia de algunas aleaciones es alta, su resistencia específica es en general menor a la de aleaciones de aluminio o magnesio. Estas aleaciones tienen mejor resistencia a la fatiga, a la termofluencia y al desgaste que las aleaciones de peso ligero de aluminio y magnesio. Muchas de estas aleaciones tienen excelente ductilidad, resistencia a la corrosión, conductividad eléctrica y térmica, y la mayor parte de ellas pueden fácilmente unirse o fabricarse en formas útiles. Las aplicaciones para aleaciones con base de cobre incluyen componentes eléctricos (alambre, por ejemplo), bombas, válvulas y piezas de plomería, en las que se aprovechan estas propiedades.

Las aleaciones de cobre también son poco usuales en cuanto a que se pueden seleccionar para producir un color decorativo apropiado. El cobre puro es rojo; las adiciones de zinc producen un color amarillo; y el níquel produce un color plateado. El cobre puede corroerse fácilmente, formando un sulfato de cobre básico $[\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2]$. Éste es un compuesto verde que es insoluble en agua (pero soluble en ácidos). Esta pátina o tonalidad verde da un atractivo acabado a muchas aplicaciones. La Estatua de la Libertad es verde por la tonalidad verde de la cubierta de cobre oxidada que cubre la estructura de acero.

La amplia variedad de aleaciones con base de cobre aprovecha todos los mecanismos de endurecimiento que se han estudiado. Los efectos de estos mecanismos de endurecimiento en las propiedades mecánicas se resumen en la tabla 14-7.

El cobre que contiene menos de 0.1% de impurezas se usa para aplicaciones eléctricas y microelectrónicas. Pequeñas cantidades de cadmio, plata y Al_2O_3 mejoran la dureza sin perjudicar la conductividad. Las aleaciones de cobre de una sola fase se endurecen con trabajo en frío. Ejemplos de este efecto se muestran en la tabla 14-7. El cobre CCCa tiene excelente ductilidad y alto coeficiente de endurecimiento por deformación.

TABLA 14-7 ■ *Propiedades de aleaciones de cobre comunes obtenidas por diferentes mecanismos de endurecimiento*

Material	Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia a la fluencia (psi)	% de elongación	Mecanismo de endurecimiento
Cu puro, recocido	30 300	4800	60	Ninguno
Cu comercialmente puro, recocido a tamaño de grano grueso	32 000	10 000	55	Solución sólida
Cu comercialmente puro, recocido a tamaño de grano fino	34 000	11 000	55	Tamaño de grano
Cu comercialmente puro, 70% trabajado en frío	57 000	53 000	4	Endurecimiento por deformación
Cu recocido, 35% de Zn	47 000	15 000	62	Solución sólida
Cu recocido, 10% de Sn	66 000	28 000	68	Solución sólida
Cu trabajado en frío, 35% de Zn	98 000	63 000	3	Solución sólida + endurecimiento por deformación
Cu endurecido por envejecimiento, 2% de Be	190 000	175 000	4	Endurecimiento por envejecimiento
Cu templado y revenido, Al	110 000	60 000	5	Reacción martensítica
Bronce al manganeso fundido	71 000	28 000	30	Reacción eutectoide

Aleaciones endurecidas por solución sólida Varias aleaciones con base de cobre contienen grandes cantidades de elementos de aleación, pero siguen siendo de una sola fase. En la figura 14-5 se ilustran importantes diagramas de fases binarios. Las aleaciones de cobre-zinc, o **latón**, con menos de 40% de Zn forman soluciones sólidas de una fase de zinc en cobre. Las propiedades mecánicas, incluso la elongación, aumentan cuando se

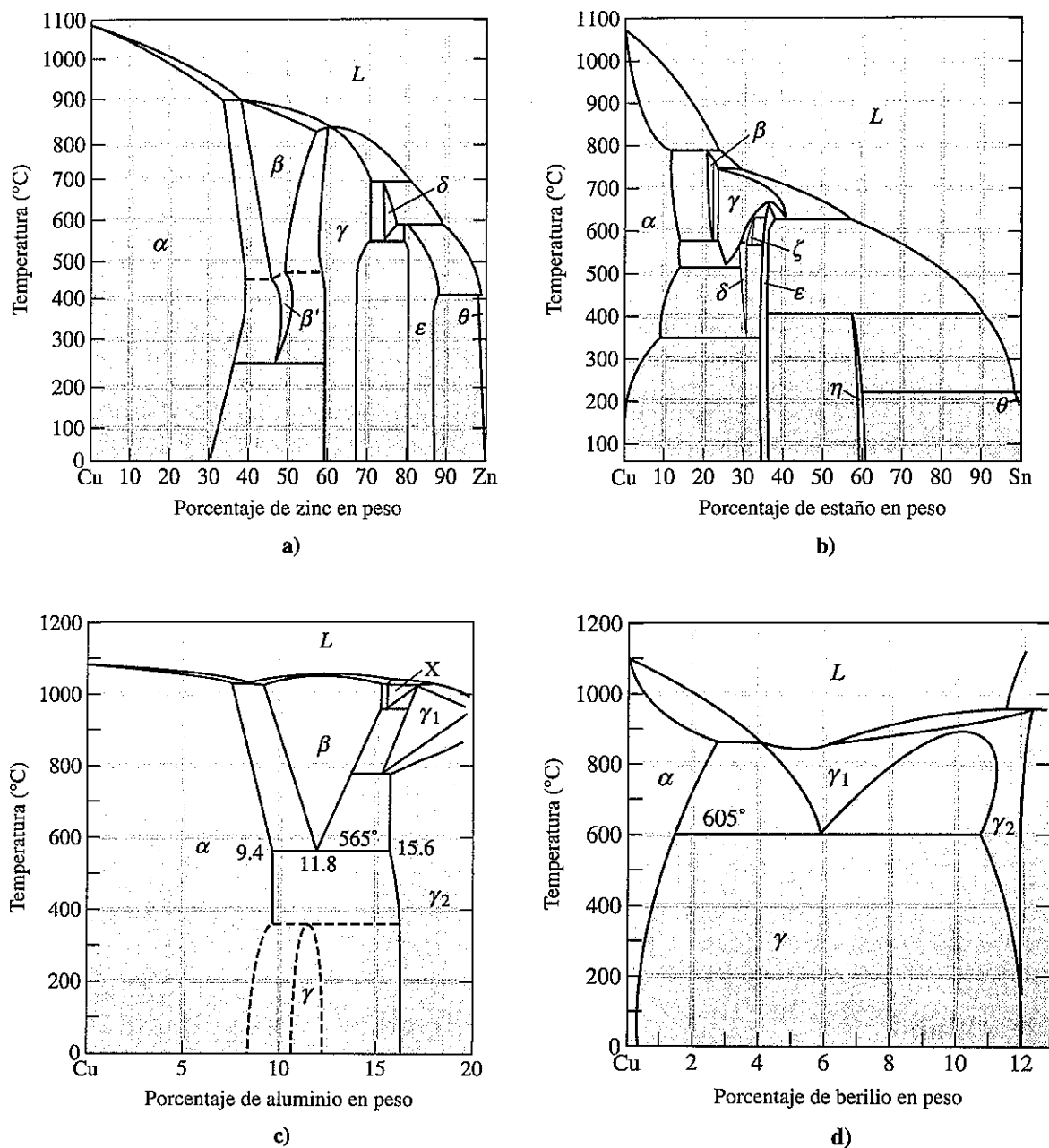


Figura 14-5 Diagramas de fases binarios para los sistemas a) cobre-zinc, b) cobre-estaño, c) cobre-aluminio y d) cobre-berilio.

incrementa el contenido de zinc. Estas aleaciones se pueden formar en frío en componentes más bien complicados pero resistentes a la corrosión. Los bronce son considerados en general como aleaciones de cobre que contienen estaño y pueden contener otros elementos. El bronce al manganeso es una aleación de resistencia particularmente alta que contiene manganeso y zinc para endurecimiento por solución sólida.

Los bronce al estaño, con frecuencia llamados bronce fosforados, pueden contener hasta 10% de Sn y permanecen de una sola fase. El diagrama de fases predice que la aleación contendrá el compuesto Cu_3Sn (ϵ); no obstante, la cinética de la reacción es tan lenta que el precipitado puede no formarse.

Las aleaciones que contienen menos de alrededor de 9% de Al o menos de 3% de Si también son de una sola fase. Estos bronce al aluminio y bronce al silicio tienen buenas características de formación y con frecuencia son seleccionados por su buena resistencia y excelente tenacidad.

Aleaciones que se pueden endurecer por envejecimiento

Varias aleaciones con base de cobre presentan una respuesta al endurecimiento por envejecimiento, incluyendo zirconio-cobre, cromo-cobre y berilio-cobre. Las aleaciones de cobre-berilio se usan por su alta resistencia, alta rigidez (que las hace útiles como resortes y alambres finos), y cualidades de no producir chispas (lo que favorece su uso, como herramientas, cerca de gases y líquidos inflamables).

Transformaciones de fase Los bronce al aluminio que contienen más de 9% de Al pueden formar la fase β al calentarse arriba de 565°C , que es la temperatura eutéctico [figura 14-5c]. Con un enfriamiento subsiguiente, la reacción eutéctico produce una estructura laminar (semejante a perlita) que contiene un compuesto γ_2 quebradizo. La reacción peritéctico a baja temperatura, $\alpha + \gamma_2 \rightarrow \gamma$, normalmente no ocurre. El producto eutéctico es relativamente débil y quebradizo, pero es posible templar rápidamente la fase β para producir martensita, o β' , que tiene alta resistencia y baja ductilidad. Cuando la β' se temple posteriormente, se obtiene una combinación de alta resistencia, buena ductilidad y excelente tenacidad como laminillas de α precipitadas a partir de la β' .

Aleaciones de cobre-plomo Prácticamente cualquiera de las aleaciones forjadas puede contener hasta 4.5% de Pb. El plomo forma una reacción monotética con el cobre y produce diminutas esferas de plomo como último líquido para solidificarse. El plomo mejora las características de maquinado. El uso de aleaciones de cobre-plomo, sin embargo, tiene un importante impacto ambiental y, en consecuencia, se han ideado nuevas aleaciones sin plomo. Los siguientes dos ejemplos ilustran el uso de aleaciones con base de cobre.

Ejemplo 14-4

Selección de diseño/materiales para un interruptor eléctrico

Diseñe los contactos para un interruptor o relevador que abre y cierra un circuito de elevada corriente eléctrica.

SOLUCIÓN

Cuando el interruptor o relevador abre y cierra, el contacto entre las superficies conductoras puede causar desgaste y da por resultado un mal contacto y arqueo. Una elevada dureza reduciría al mínimo el desgaste, pero los materiales de contacto deben permitir que la elevada corriente pase por la conexión sin sobrecalentarse ni formar arqueo.

Por tanto, el diseño debe dar buena conductividad eléctrica y buena resistencia al desgaste. Quizá sería ideal una aleación de cobre relativamente pura endurecida por dis-

persión con una fase dura que no altere la red del cobre. En una aleación de Cu-Al₂O₃, las partículas duras de óxido de cerámica darían la resistencia al desgaste pero sin interferir con la conductividad eléctrica de la matriz de cobre.

Ejemplo 14-5

Diseño de un tratamiento térmico para un engrane de aleación Cu-Al

Diseñe el tratamiento térmico necesario para producir un engrane de aluminio-bronce de alta resistencia, que contenga 10% de Al.

SOLUCIÓN

El bronce al aluminio puede ser endurecido por un tratamiento térmico de templado y revenido. Se debe calentar arriba de 900 °C para obtener 100% de β para una aleación Cu-10% Al [figura 14-5c]. La temperatura eutectoide para la aleación es de 565 °C. Por tanto, el tratamiento térmico recomendado es

1. Calentar la aleación a 950 °C y mantener así para producir 100% de β .
2. Templar la aleación a temperatura ambiente para que la β se transforme en martensita, β' , que está supersaturada en cobre.
3. Revenir por debajo de 565 °C; una temperatura de 400 °C podría ser apropiada. Durante el revenido, la martensita se transforma en α y γ_2 . La cantidad de γ_2 que se forma a 400 °C es

$$\% \gamma_2 = \frac{10 - 9.4}{15.6 - 9.4} \times 100 = 9.7\%$$

4. Enfriar rápidamente a temperatura ambiente para que γ no se forme.

Nótese que si el revenido se ejecuta por debajo de unos 370 °C, se formaría γ en lugar de γ_2 .

14-4 Aleaciones de níquel y cobalto

Se usan aleaciones de níquel y cobalto para protección contra la corrosión y por su resistencia a alta temperatura, aprovechando sus altos puntos de fusión y altas resistencias. El níquel es CCCa y tiene buena capacidad de formación; el cobalto es un metal alotrópico, con una estructura CCCa arriba de 417 °C y una estructura CH a menores temperaturas. Las aleaciones especiales de cobalto se usan por excepcional resistencia al desgaste y, por su resistencia a fluidos del cuerpo humano, para aparatos de prótesis. Las aleaciones comunes y sus aplicaciones aparecen en la tabla 14-8.

En el capítulo 10 se estudió qué tan rápido se pueden formar polvos solidificados de superaleaciones con base en níquel y cobalto, usando atomización por rociado seguida de prensado isostático en caliente. Estos materiales se usan para hacer los anillos que retienen álabes de turbinas, así como para álabes de turbinas para motores de aviones. En el capítulo 12 se estudiaron las aplicaciones de las aleaciones con memoria de forma basadas en Ni-Ti. El hierro, el níquel y el cobalto son ferromagnéticos. Ciertas aleaciones basadas en Fe-Ni y Fe-Co forman muy buenos materiales magnéticos (capítulo 20). Una aleación de Ni-36% Fe (Invar) no presenta prácticamente ninguna expansión durante su calentamiento; este efecto se explota para producir materiales compuestos bimetálicos. El cobalto se usa en herramientas de corte de WC-Co.

TABLA 14-8 ■ Composiciones, propiedades y aplicaciones de aleaciones selectas de níquel y cobalto

Material	Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia a la fluencia (psi)	% de elongación	Mecanismo de endurecimiento	Aplicaciones
Ni puro (99.9% Ni)	50 000	16 000	45	Recocido	Resistencia a la corrosión
	95 000	90 000	4	Trabajado en frío	Resistencia a la corrosión
Aleaciones de Ni-Cu:					
Monel 400 (Ni-31.5% Cu)	78 000	39 000	37	Recocido	Válvulas, bombas, intercambiadores de calor
Monel K-500 (Ni-29.5% Cu-2.7% Al-0.6% Ti)	150 000	110 000	30	Envejecido	Ejes, resortes, impulsores
Superalaleaciones de Ni:					
Inconel 600 (Ni-15.5% Cr-8% Fe)	90 000	29 000	49	Carburos	Equipo para tratamiento térmico
Hastelloy B-2 (Ni-28% Mo)	130 000	60 000	61	Carburos	Resistencia a la corrosión
DS-Ni (Ni-2% ThO ₂)	71 000	48 000	14	Dispersión	Turbinas de gas
Superalaleaciones de Fe-Ni:					
Incoloy 800 (Ni-46% Fe-21% Cr)	89 000	41 000	37	Carburos	Intercambiadores de calor
Superalaleaciones de Co					
Estelita 6B (60% Co-30% Cr-4.5% W)	177 000	103 000	4	Carburos	Resistencia al desgaste abrasivo

Níquel y Monel El níquel y sus aleaciones tienen excelente una resistencia a la corrosión y buenas características de formado. Cuando se agrega cobre al níquel, se obtiene una resistencia máxima cercana al 60% de Ni. Se usan varias aleaciones, llamadas **Monel** con aproximadamente esta composición, por su fortaleza y resistencia a la corrosión en agua salada y a temperaturas elevadas. Algunas de las aleaciones de Monel contienen pequeñas cantidades de aluminio y titanio. Estas aleaciones muestran una respuesta al endurecimiento por envejecimiento por la precipitación de γ' , un precipitado de Ni_3Al o Ni_3Ti coherente que casi duplica las propiedades a la tensión. Los precipitados resisten el exceso de envejecimiento a temperaturas de hasta 425 °C (figura 14-6).

Superalaleaciones Las superaleaciones son aleaciones de níquel, hierro-níquel y de cobalto que contienen grandes cantidades de elementos de aleación destinados a producir una combinación de alta resistencia a elevadas temperaturas, resistencia a la termofluencia a temperaturas hasta de 1000 °C, y resistencia a la corrosión. Estas excelentes propiedades a altas temperaturas se obtienen aun cuando las temperaturas de fusión de las aleaciones sean aproximadamente iguales que las de aceros. Sus aplicaciones comunes incluyen álabes y deflectores para turbinas y motores a reacción, intercambiadores de calor, componentes de recipientes para reacciones químicas, así como equipo para tratamiento térmico.

Para obtener alta resistencia y resistencia a la termofluencia, los elementos de aleación deben producir una microestructura fuerte y estable a altas temperaturas. Generalmente se utilizan endurecimiento por solución sólida, endurecimiento por dispersión y endurecimiento por precipitación.

Endurecimiento por solución sólida Grandes adiciones de cromo, molibdeno y tungsteno, así como pequeñas adiciones de tantalio, zirconio, niobio y boro dan endurecimiento por solución sólida. Los efectos del endurecimiento por solución sólida son

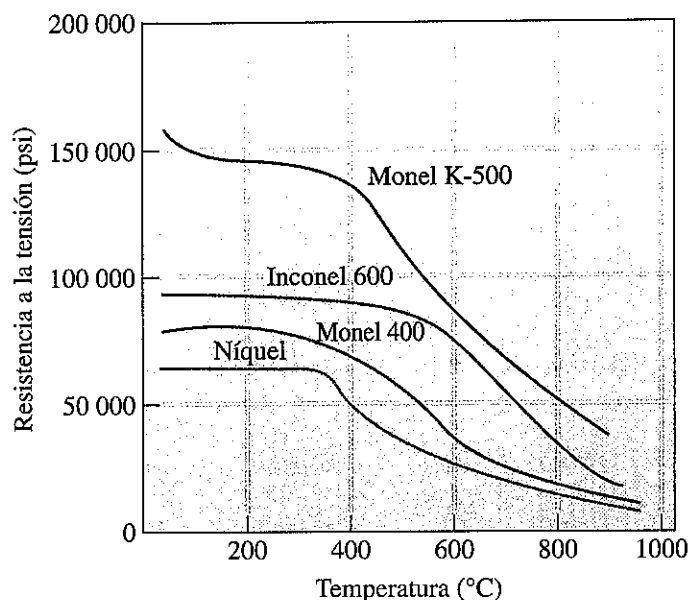


Figura 14-6
Efecto de la temperatura en la resistencia a la tensión de varias aleaciones con base de níquel.

estables y, en consecuencia, hacen que la aleación sea resistente a la termofluencia, en particular cuando se usan átomos grandes como los del molibdeno y tungsteno (que se difunden lentamente).

Endurecimiento por dispersión de carburos Todas las aleaciones contienen una pequeña cantidad de carbono que, por combinación con otros elementos de aleación, produce una red de partículas de carburo finas y estables. La red de carburo interfiere con el movimiento de dislocaciones e impide el deslizamiento de límites de granos. Los carburos incluyen TiC , BC , ZrC , TaC , Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$, Mo_6C y W_6C , aunque a veces son más complejos y contienen varios elementos de aleación. La Stellite 6B, superaleación con base de cobalto, tiene una resistencia al desgaste excepcionalmente buena a altas temperaturas debido a estos carburos.

Endurecimiento por precipitación Muchas de las superaleaciones de níquel y níquel-hierro que contienen aluminio y titanio forman el precipitado coherente γ' (Ni_3Al o Ni_3Ti) durante el envejecimiento. Las partículas γ' (figura 14-7) tienen una estructura cristalina y parámetro de red que es semejante a los de la matriz de níquel; esta similitud lleva a una baja energía de superficie y reduce al mínimo el envejecimiento de las aleaciones, dando buena resistencia y también buena resistencia a la termofluencia incluso a altas temperaturas.

Al hacer variar la temperatura de envejecimiento, se pueden producir precipitados de varios tamaños. Precipitados pequeños, formados a bajas temperaturas de envejecimiento, pueden crecer entre los precipitados más grandes producidos a temperaturas más altas, con lo cual aumenta el porcentaje en volumen de γ' e incrementando todavía más la resistencia [figura 14-7b)].

El uso de superaleaciones de alta temperatura puede mejorar cuando se utiliza un recubrimiento de cerámica. Un método para hacer esto es cubrir primero la superaleación con un recubrimiento de enlace metálico, compuesto por una compleja aleación de $NiCoCrAlY$, y luego aplicar un recubrimiento exterior de barrera térmica de una cerámica estabilizada de ZrO_2 (capítulo 5). El recubrimiento ayuda a reducir la oxidación de la superaleación y permite que motores a reacción operen a temperaturas más altas y con mayor eficiencia. El siguiente ejemplo muestra una aplicación de una superaleación con base de níquel.

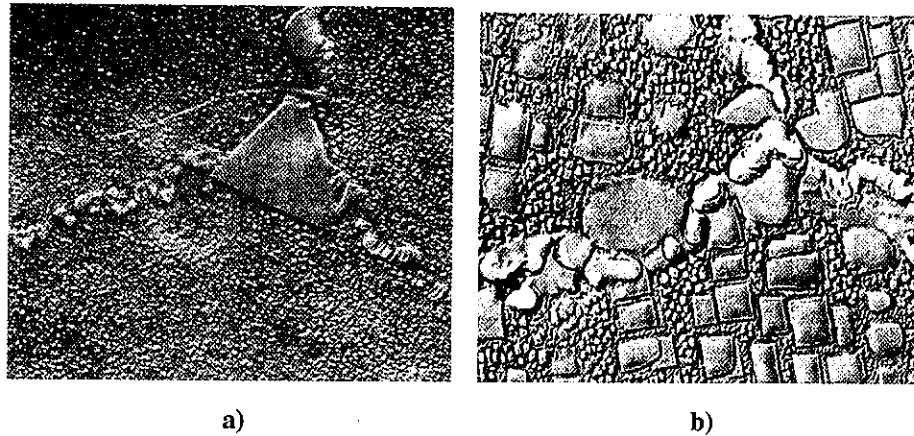


Figura 14-7 a) Microestructura de una superaleación, con carburos en los límites de granos y precipitados γ' en la matriz (15 000 $\times$). b) Microestructura de una superaleación envejecida a dos temperaturas, produciendo precipitados cúbicos γ' grandes y pequeños (10 000 $\times$). (De ASM Handbook, vol. 9, *Metallography and Microstructure* (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.)

Ejemplo 14-6

Selección de diseño/materiales para un álabe de alto rendimiento para turbina de un motor a reacción

Diseñe una superaleación con base de níquel para producir álabes de turbina para un motor de turbina de gas para avión, que tendrá un tiempo particularmente largo de ruptura por termofluencia a temperaturas que se aproximan a 1100 °C.

SOLUCIÓN

Primero, se necesita una microestructura muy estable. La adición de aluminio o titanio permite la precipitación de hasta 60% en volumen de la fase γ' , durante el tratamiento térmico, y puede permitir que la aleación opere a temperaturas que se aproximan a 0.85 veces la temperatura absoluta de fusión. La adición de carbono y de elementos de aleación como tantalio y hafnio permite la precipitación de carburos de aleación que impiden que los límites de granos se deslicen a temperaturas altas. Otros elementos de aleación, incluyendo molibdeno y tungsteno, dan endurecimiento por solución sólida.

En segundo término, se podría producir un álabe para turbina direccionalmente solidificado o incluso monocristalino (capítulo 9). En la solidificación direccional se forman sólo granos columnares durante la solidificación, eliminando límites transversales de grano que podrían nuclear grietas. En un monocristal, no hay límites de granos. Se podría usar el proceso de fundición por revestimiento, estando seguros de pasar la superaleación líquida por un filtro para atrapar cualesquiera diminutas inclusiones antes de que el metal entre en el molde de revestimiento cerámico.

Entonces se daría tratamiento térmico a la pieza fundida para asegurar que los carburos y el precipitado γ' tengan el tamaño y distribución correctos. Pueden usarse múltiples temperaturas de envejecimiento para asegurar que se forme el volumen más grande posible de γ' .

Por último, el álabe puede contener pequeños canales de enfriamiento en su longitud. El aire para la combustión en el motor puede pasar por estos canales, dando un enfriamiento activo al álabe, antes de reaccionar con el combustible en la cámara de combustión.

14-5 Aleaciones de titanio

El titanio se produce a partir del TiO_2 por medio del proceso Kroll. El TiO_2 se convierte en TiCl_4 (tetracloruro de titanio, también conocido de manera informal como *cosquilla*), que posteriormente se reduce a metal titanio por medio de sodio o magnesio. La esponja resultante de titanio se consolida entonces, aleada según sea necesario, y procesada usando fundición de arco eléctrico al vacío. Un proceso más eficiente en costo es producir esponja de titanio directamente a partir del TiO_2 . El titanio proporciona una excelente resistencia a la corrosión, alta resistencia específica y buenas propiedades a altas temperaturas. Resistencias hasta de 200 000 psi (1400 MPa), junto con una densidad de 4.505 g/cm³, dan excelentes propiedades mecánicas. Una película adherente y protectora de TiO_2 da excelente resistencia a la corrosión y contaminación por debajo de los 535 °C. Arriba de esa temperatura, la película de óxido se descompone y átomos pequeños como carbono, oxígeno, nitrógeno e hidrógeno hacen quebradizo al titanio.

La excelente resistencia del titanio a la corrosión permite su aplicación en equipo para procesos químicos, componentes marinos e implantes biomédicos por ejemplo prótesis de cadera. El titanio es un importante material aeroespacial, y tiene aplicaciones como bastidores para aviones y componentes para motores a reacción. Cuando se combina con el niobio, se forma un compuesto intermetálico superconductor; con níquel, la aleación resultante presenta el efecto de memoria de forma; cuando se combina con aluminio, se produce una nueva clase de aleaciones intermetálicas, como se explica en el capítulo 11. Las aleaciones de titanio se usan para equipo deportivo como cabezas de palos de golf.

El titanio es alotrópico, con la estructura cristalina CH (α) a bajas temperaturas y una estructura CCCu (β) arriba de 882 °C. Los elementos de aleación dan endurecimiento por solución sólida y cambian la temperatura de transformación alotrópica. Los elementos de aleación pueden dividirse en cuatro grupos (figura 14-8). Adiciones como estaño y zirconio dan endurecimiento por solución sólida sin afectar la temperatura de transformación. El aluminio, oxígeno, hidrógeno y otros elementos estabilizadores α aumentan la temperatura a la que α se transforma en β . Los estabilizadores β como el vanadio, tantalio, molibdeno y niobio bajan la temperatura de transformación, causando incluso que β sea estable a temperatura ambiente. Por último, el manganeso, cromo y hierro producen una reacción eutéctide, reduciendo la temperatura a la que ocurre la transformación α - β y produciendo una estructura de dos fases a temperatura ambiente. Varias categorías de titanio y sus aleaciones aparecen en la tabla 14-9.

Titanio comercialmente puro El titanio no aleado se utiliza por su superior resistencia a la corrosión. Impurezas como el oxígeno aumentan la resistencia del titanio (figura 14-9) pero reducen la resistencia a la corrosión. Entre sus aplicaciones se cuentan la de intercambiadores de calor, tuberías, reactores, bombas y válvulas para las industrias química y petroquímica.

Aleaciones de titanio alfa La más común de todas las aleaciones α contiene 5% de Al y 2.5% de Sn, que dan endurecimiento por solución sólida a la α CH. Las aleaciones α son recocidas a altas temperaturas en la región β . El rápido enfriamiento da una estructura acicular de grano α , o de Widmanstätten (figura 14-10) que da buena resistencia a la fatiga. El enfriamiento en horno da una estructura α más semejante a placas que proporciona buena resistencia a la termofluencia.

Aleaciones de titanio beta Aun cuando grandes adiciones de vanadio o molibdeno producen una estructura enteramente β a temperatura ambiente, ninguna de las aleaciones β en realidad son aleadas a ese grado. En cambio, son ricas en estabilizadores β , de

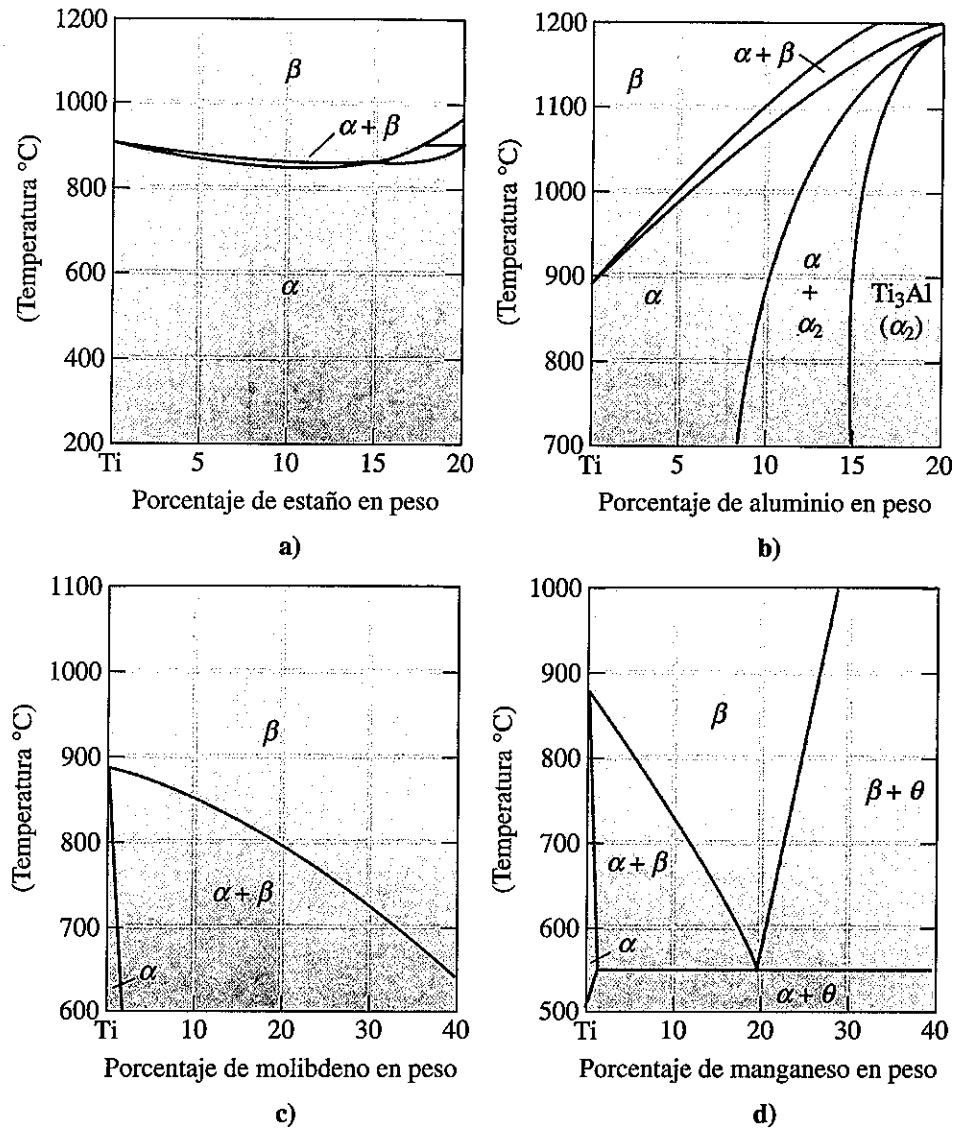


Figura 14-8 Partes de los diagramas de fases para a) titanio-estaño, b) titanio-aluminio, c) titanio-molibdeno y d) titanio-manganeso.

TABLA 14-9 ■ Propiedades de aleaciones selectas de titanio

Material	Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia a la fluencia (psi)	% de elongación
Ti comercialmente puro:			
99.5% Ti	35 000	25 000	24
99.0% Ti	80 000	70 000	15
Aleaciones alfa de Ti:			
5% Al-2.5% Sn	125 000	113 000	15
Aleaciones beta de Ti:			
13% V-11% Cr-3% Al	187 000	176 000	5
Aleaciones alfa-beta de Ti:			
6% Al-4% V	150 000	140 000	8

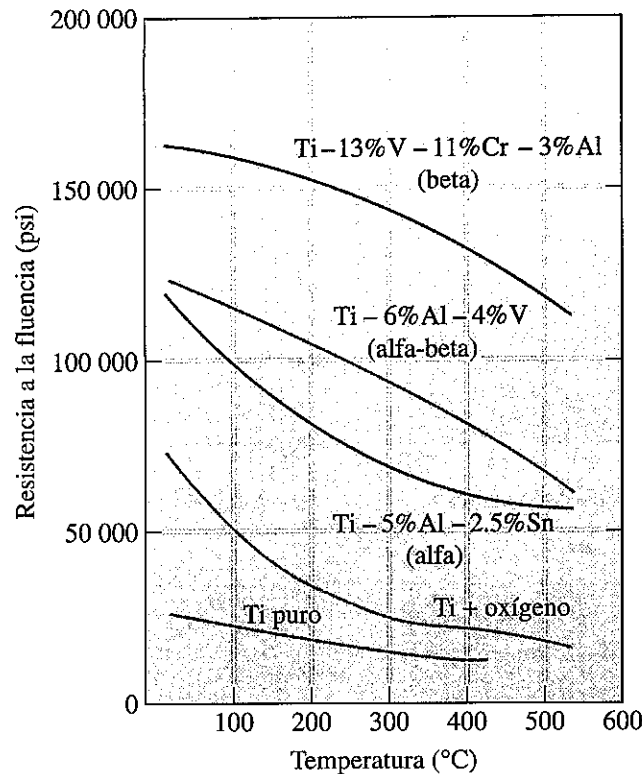


Figura 14-9
Efecto de la temperatura en la resistencia a la fluencia de aleaciones selectas de titanio.

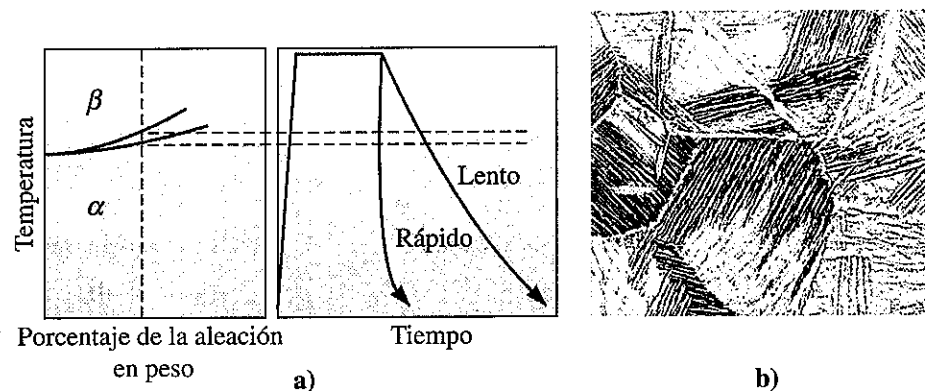


Figura 14-10 a) Recocido y b) microestructura de titanio α enfriado rápidamente (100 $\times$). Tanto el precipitado de límites de grano y las placas Widmanstätten son α . (De ASM Handbook, vol. 7 (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073.)

modo que un rápido enfriamiento produce una estructura metaestable compuesta solo de β . El endurecimiento se obtiene tanto de la gran cantidad de elementos de aleación de endurecimiento por solución sólida como por envejecimiento de la estructura β metaestable para permitir que α se precipite. Las aplicaciones incluyen sujetadores de alta resistencia, viguetas y otras conexiones para aplicaciones en la industria aeroespacial.

Aleaciones de titanio alfa-beta Con un adecuado equilibrio de los estabilizadores α y β , se produce una mezcla de α y β a temperatura ambiente. La aleación Ti-6% Al-4% V, un ejemplo de este método, es con mucho la más común de todas las aleacio-

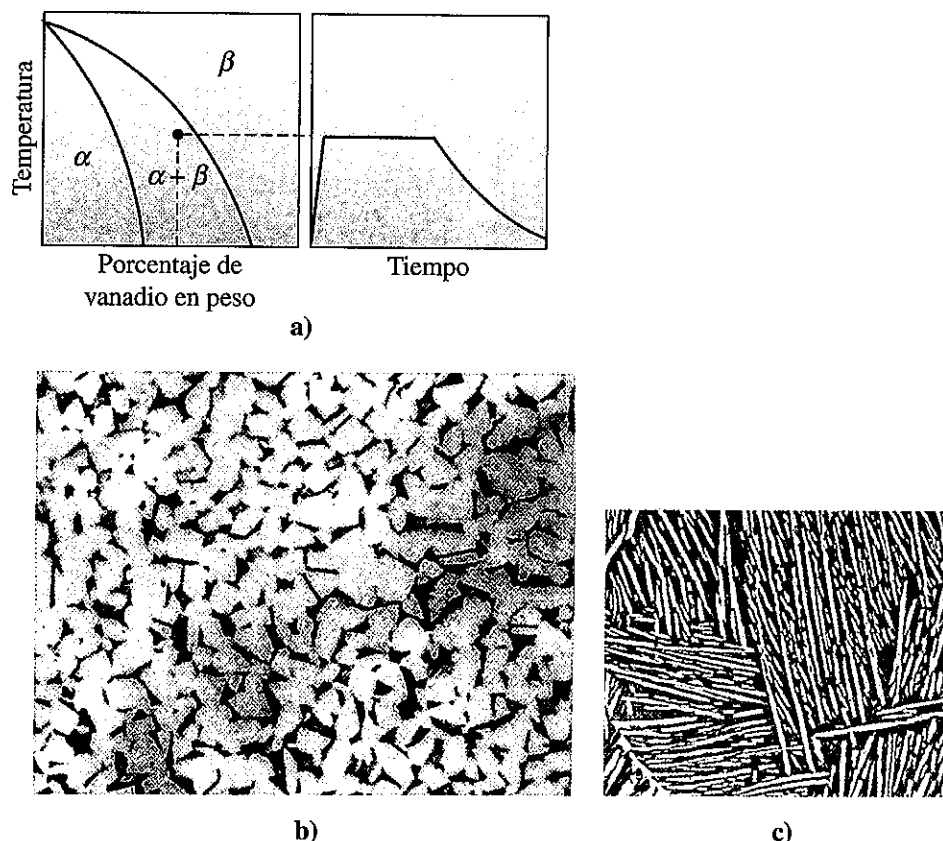
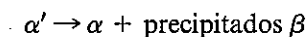


Figura 14-11 Recocido de una aleación de titanio α - β . a) El recocido se hace apenas debajo de la temperatura de transformación α - β , b) un enfriamiento lento da granos α equiaxiales (250 $\times$) y c) un enfriamiento rápido da granos α aciculares (2500 $\times$). (De ASM Handbook, vol. 7 (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.)

nes de titanio. Debido a que las aleaciones contienen dos fases, se pueden usar tratamientos térmicos para controlar la microestructura y las propiedades.

El recocido proporciona una combinación de alta ductilidad, propiedades uniformes y buena resistencia. La aleación se calienta justo por debajo de la temperatura de transición β , lo que permite que una pequeña cantidad de α permanezca e impida el crecimiento de granos (figura 14-11). Un enfriamiento lento ocasiona que se formen granos α equiaxial; la estructura equiaxial proporciona buena ductilidad y facilidad de formado al mismo tiempo que dificulta que se formen grietas. Un enfriamiento más rápido, en particular por arriba de la temperatura de transición α - β , produce una fase α acicular, o de "tejido de canasta" [figura 14-11c]. Aun cuando se pueden formar grietas por fatiga con más facilidad en esta estructura, las grietas pueden seguir una tortuosa dirección a lo largo de los límites entre α y β . Esta condición resulta en un lento crecimiento de grietas por fatiga, buena tenacidad a fracturas y buena resistencia a la termofluencia.

Se pueden producir dos posibles microestructuras cuando la fase β se temple a partir de una alta temperatura. El diagrama de fases de la figura 14-12 incluye una línea discontinua de inicio de martensita, que da la base para un tratamiento de templeado y revenido. La β se transforma en martensita de titanio (α') en una aleación que cruza la línea M_s al enfriarse. La martensita de titanio es una fase supersaturada relativamente blanda. Cuando se recalienta α' , el revenido ocurre por la precipitación de β a partir de la α' supersaturada:



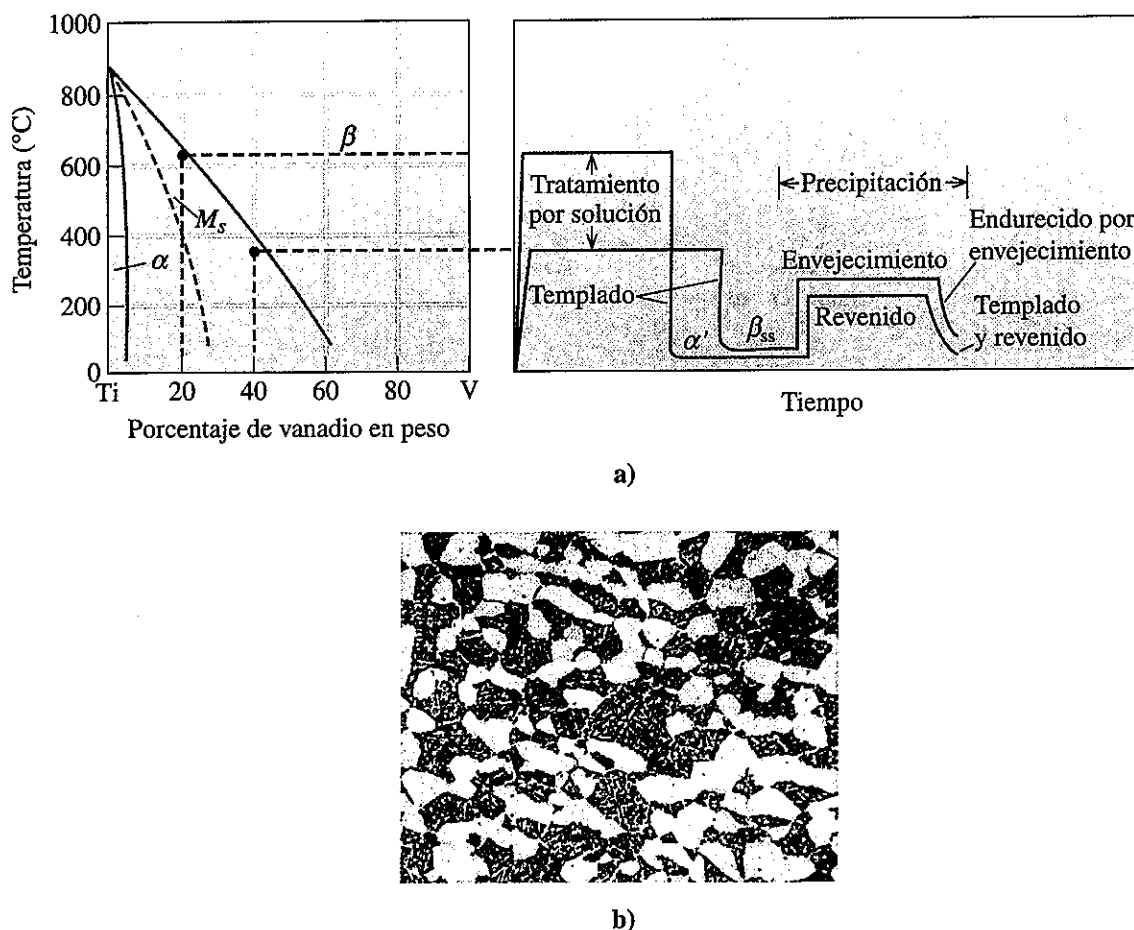
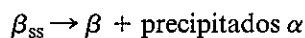


Figura 14-12 a) Tratamiento térmico y b) microestructura de las aleaciones de titanio α - β . La estructura contiene α primaria (granos blancos grandes) y una matriz β oscura con agujas de α formadas durante el envejecimiento (250 $\times$). (De ASM Handbook, vol. 7 (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073.)

Los precipitados β finos inicialmente aumentan la resistencia en comparación con los α' , opuesto a lo que se encuentra cuando se temple una martensita de acero; no obstante, ocurre un ablandamiento cuando se hace el temple a una temperatura demasiado alta.

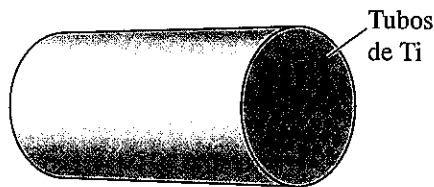
Las composiciones α - β más altamente aleadas son endurecidas por envejecimiento. Cuando la β en estas aleaciones se temple, β_{ss} , que está sobresaturada en titanio, permanece. Cuando la β_{ss} es envejecida, α se precipita en una estructura Widmanstätten (figura 14-12):



La formación de esta estructura lleva a una mejor resistencia y tenacidad a fracturas. Los componentes para aviones, cohetes, motores a reacción y trenes de aterrizaje son aplicaciones típicas para las aleaciones α - β con tratamiento térmico. Algunas aleaciones, incluyendo la aleación Ti-6% Al-4% V, son superplásticas y pueden deformarse hasta 100%. Esta aleación también se emplea para hacer implantes para el cuerpo humano. Las aleaciones de titanio son consideradas **biocompatibles** (es decir, no son rechazadas por el cuerpo). Al perfeccionar recubrimientos porosos de composiciones de cerámica semejantes al hueso, conocidas como hidroxiapatita, es posible hacer implantes de titanio **bioactivos** (es decir, el hueso natural puede crecer en el recubrimiento de hidroxiapatita). Los siguientes tres ejemplos ilustran aplicaciones de aleaciones de titanio.

Ejemplo 14-7*Diseño de un intercambiador de calor*

Diseñe un intercambiador de calor de 5 ft de diámetro, 30 ft de largo, para la industria petroquímica (figura 14-13).

**Figura 14-13**

Bosquejo de un intercambiador de calor con tubos de titanio (para ejemplo 14-7).

SOLUCIÓN

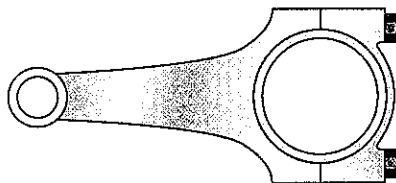
El intercambiador de calor debe satisfacer varios criterios de diseño. Debe tener buena resistencia a la corrosión para manejar productos agresivos de la refinación química; debe operar a temperaturas relativamente altas; debe formarse fácilmente en láminas y tubos de los cuales se fabricará el intercambiador de calor; y asimismo debe tener buenas facilidades para soldarse para unir los tubos al cuerpo del intercambiador de calor.

Siempre que la máxima temperatura de operación sea inferior a 535 °C para que la película de óxido sea estable, el titanio podría ser una buena opción para dar resistencia a la corrosión a temperaturas elevadas. Un titanio comercialmente puro da la mejor resistencia a la corrosión.

El titanio puro también da una superior característica de formado y de soldadura y, por tanto, sería la selección más lógica. Si el titanio puro no da suficiente resistencia, una alternativa es una aleación de titanio α , que todavía proporciona buena resistencia a la corrosión, características de formado y facilidad para soldadura pero también una resistencia un poco mejor.

Ejemplo 14-8*Diseño de una biela*

Diseñe una biela de alto rendimiento para el motor de un automóvil de carreras (figura 14-14).

**Figura 14-14**

Bosquejo de una biela (para el ejemplo 14-8).

SOLUCIÓN

Un motor de alto rendimiento para competencias exige materiales que puedan operar a temperaturas y esfuerzos altos, al mismo tiempo que reduzcan al mínimo el peso del motor. En automóviles normales, las bielas a veces son de acero forjado o de un hierro fundido maleable. Se podría ahorrar un peso considerable al sustituir estas piezas con titanio.

Para alcanzar altas resistencias, se podría considerar una aleación de titanio α - β . Debido a su disponibilidad, la aleación Ti-6% Al-4% V es una buena opción. La aleación se calienta a unos 1065 °C, que está en la parte totalmente β del diagrama de fases. Al templar, se forma martensita de titanio; subsecuentes revenidos producen una microestructura que contiene precipitados β en una matriz α .

Cuando el tratamiento térmico se realiza en la región totalmente β , la martensita revenida tiene una estructura acicular, que reduce la rapidez de crecimiento de cualquier grietas por fatiga que pudiera formarse.

Ejemplo 14-9

Materiales para prótesis de cadera

¿Qué tipo de material escogería usted para un implante total de cadera?

SOLUCIÓN

Una prótesis de cadera está destinada a sustituir parte del hueso fémur desgastado o dañado. (Vea la imagen con que inicia este capítulo.) El implante tiene una cabeza de metal y se ajusta en la cavidad del fémur. Es necesario considerar los siguientes factores: biocompatibilidad, resistencia a la corrosión, alta resistencia a la fractura, excelente vida de fatiga (para que los implantes duren muchos años puesto que es difícil hacer la cirugía conforme los pacientes se hacen más viejos) y resistencia al desgaste. También es necesario considerar la rigidez. Si la aleación escogida es demasiado rígida en comparación con el hueso, casi toda la carga será llevada por el implante. Esto lleva a un debilitamiento del resto del hueso y, a su vez, puede hacer que el implante se afloje. Entonces, se necesita un material que tenga una alta resistencia a la tensión, resistencia a la corrosión, biocompatibilidad y resistencia a fracturas. Estos requisitos sugieren un acero inoxidable 316 o Ti-6% Al-4% V. Ninguno de estos materiales es ferromagnético y ambos son opacos a los rayos X. Esto es bueno para imágenes de resonancia magnética y de rayos X. Las aleaciones de titanio no son muy duras y pueden desgastarse. Los aceros inoxidables son más duros, pero son mucho más rígidos que el hueso. El titanio es biocompatible y sería una mejor opción. Quizá un material compuesto en el que el vástago se haga de una aleación Ti-6% Al-4% V y la cabeza se haga de una cerámica resistente al desgaste, resistente a la corrosión y relativamente tenaz, como la alúmina, puede ser la respuesta. El interior de la concavidad podría hacerse de un polietileno de densidad ultraalta (de peso molecular ultraalto) que tenga un coeficiente de fricción muy bajo. La superficie del implante podría hacerse porosa para estimular el hueso a que crezca. Otra opción es recubrir el implante con un material como hidroxiapatita porosa para estimular el crecimiento del hueso.

14-6

Metales refractarios y preciosos

Los **metales refractarios**, que incluyen tungsteno, molibdeno, tantalio y niobio (o columbio), tienen temperaturas de fusión excepcionalmente altas (arriba de 1925 °C) y, en consecuencia, tienen el potencial para servicio a alta temperatura. Las aplicaciones incluyen filamentos para bombillas eléctricas, toberas para cohetes, generadores de energía eléctrica nucleares, capacitores electró-

TABLA 14-10  Propiedades de algunos metales refractarios

Metal	Temperatura de fusión (°C)	Densidad (g/cm ³)	T = 1000 °C		Temperatura de transición (°C)
			Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia a la fluencia (psi)	
Nb	2468	8.57	17 000	8 000	-140
Mo	2610	10.22	50 000	30 000	30
Ta	2996	16.6	27 000	24 000	-270
W	3410	19.25	66 000	15 000	300

nicos con base de tantalio y niobio, así como equipo de procesamiento químico. Los metales, no obstante, tienen una alta densidad, lo cual limita sus resistencias específicas (tabla 14-10).

Oxidación Los metales refractarios empiezan a oxidarse entre 200 y 425 °C y son rápidamente contaminados o se hacen quebradizos. En consecuencia, se requiere de precauciones especiales durante su fundición, trabajo en caliente, soldadura o metalurgia de polvos. Los metales deben también ser protegidos durante el servicio a elevadas temperaturas. Por ejemplo, el filamento de tungsteno de una bombilla eléctrica está protegido por un vacío.

Para algunas aplicaciones, los metales pueden estar recubiertos con una capa de silicio o de aluminio. La capa debe a) tener una elevada temperatura de fusión, b) ser compatible con el metal refractario, c) proporcionar una barrera de difusión para evitar que lleguen contaminantes a la capa base y d) tener un coeficiente de expansión térmica similar a la del metal refractario. Hay recubrimientos que protegen el metal hasta a unos 1650 °C. En algunas aplicaciones, por ejemplo en capacitores para teléfonos celulares, la formación de óxidos es útil dado que se desea hacer uso del óxido como material no conductor.

Características de formado Los metales refractarios, que tienen la estructura cristalina CCCu, presentan una temperatura de transición de dúctil a quebradiza. Como las temperaturas de transición para el niobio y el tantalio están por debajo de la temperatura ambiente, estos dos metales se pueden formar fácilmente. El molibdeno y el tungsteno recocidos, sin embargo, normalmente tienen una temperatura de transición por arriba de la temperatura ambiente que los hace quebradizos. Por fortuna, si estos metales se trabajan en caliente para producir una microestructura fibrosa, la temperatura de transición se baja y se mejoran las características de formación.

Aleaciones Por medio de aleaciones se obtienen grandes aumentos tanto en temperatura ambiente como a alta temperatura en las propiedades mecánicas. El tungsteno aleado con hafnio, renio y carbono puede operar hasta a 2100 °C. Por lo general, estas aleaciones son endurecidas por solución sólida; de hecho, el tungsteno y el molibdeno forman una serie completa de soluciones sólidas, en forma muy parecida al cobre y el níquel. Algunas aleaciones, como el W-2% ThO₂, son endurecidas por dispersión por partículas de óxido durante su manufactura por medio de procesos de metalurgia. Los materiales compuestos, como el niobio reforzado con fibras de tungsteno, pueden también mejorar las propiedades a altas temperaturas.

Metales preciosos Éstos incluyen al oro, la plata, el paladio, el platino y el rodio. Como su nombre lo indica, son preciosos y costosos. Desde un punto de vista de ingeniería, estos materiales resisten la corrosión y son muy buenos conductores de electricidad. Como consecuen-

cia de lo anterior, las aleaciones de estos materiales se usan con frecuencia como electrodos para dispositivos. Estos electrodos se forman usando la deposición de películas delgadas (por ejemplo chisporroteo o galvanoplastia) o impresión por serigrafía de dispersiones/pastas de polvo de metal. Nanopartículas de Pt/Rh/Pd (cargadas en un soporte cerámico) también se usan como catalizadores en automóviles. Estos metales facilitan la oxidación del CO en CO₂ y del NO_x en N₂ y O₂. También se usan como catalizadores en la refinación de petróleo.

Resumen

- Los “metales ligeros” incluyen aleaciones de baja densidad con base de aluminio, magnesio y berilio. Las aleaciones de aluminio tienen alta resistencia específica debido a su baja densidad y, como resultado de esto, encuentran muchas aplicaciones en la industria aeroespacial. Excelente resistencia a la corrosión y buena conductividad eléctrica del aluminio también contribuyen a un vasto número de aplicaciones. El aluminio y el magnesio están limitados en su uso a bajas temperaturas debido a la pérdida de sus propiedades mecánicas como resultado de exceso de envejecimiento o recrystalización. Las aleaciones de cobre (latones y bronce) también se usan en numerosas aplicaciones estructurales y de otros tipos. Las aleaciones de titanio tienen densidades y resistencia a la temperatura intermedia, junto con excelente resistencia a la corrosión, lo que lleva a sus aplicaciones en la industria aeroespacial, procesos químicos y aparatos biomédicos.
- Las aleaciones de níquel y cobalto, incluyendo superaleaciones, presentan buenas propiedades a temperaturas incluso más altas. Combinadas con su buena resistencia a la corrosión, estas aleaciones encuentran numerosas aplicaciones en motores para aviones y equipo para procesos químicos.

Glosario

Aleación no ferrosa Aleación basada en algún metal que no sea hierro.

Aleaciones forjadas Aleaciones a las que se da forma mediante un proceso de deformación.

Bioactivo Material que no es rechazado por el cuerpo humano y a la larga se hace parte del cuerpo (por ejemplo hidroxiapatita).

Biocompatible Material que no es rechazado por el cuerpo humano.

Bronce Generalmente, aleaciones de cobre que contienen estaño pero pueden contener otros elementos.

Cobre ampillado Forma impura de cobre obtenida durante el proceso de refinación de cobre.

Designación de temple Notación breve que utiliza letras y números para describir el procesamiento de una aleación. Los temples H se refieren a aleaciones trabajadas en frío; los T se refieren a tratamientos de endurecimiento por envejecimiento.

Facilidad de moldeo Facilidad con la que un metal puede ser vaciado en un molde para hacer una pieza fundida, sin producir defectos o requerir técnicas poco comunes o costosas para evitar problemas de fundición.

Fluidez Capacidad de un metal líquido para llenar cavidades en moldes sin solidificarse prematuramente.

Latón Grupo de aleaciones con base de cobre, que normalmente contiene zinc como principal elemento de aleación.

Metales refractarios Metales que tienen una temperatura de fusión arriba de 1925 °C.

Monel Aleación de cobre-níquel, que contiene aproximadamente 60% de Ni, que da máxima resistencia en el sistema de aleación binario.

Resistencia específica Relación entre resistencia y densidad. También llamada relación entre resistencia y peso.

Superaleaciones Grupo de aleaciones con base en níquel, hierro-níquel y cobalto que tienen excepcional resistencia al calor, resistencia a termofluencia y resistencia a la corrosión.

Problemas

14-1 En algunos casos, es posible que interese más el costo por unidad de volumen que el costo por unidad de peso. Vuelva a elaborar la tabla 14-1 para mostrar el costo en términos de $\$/\text{cm}^3$. ¿Esto cambia o altera la relación entre los diferentes materiales?

14-2 Determine la resistencia específica de los siguientes metales y aleaciones (use las densidades del principal componente metálico como una aproximación de la densidad de aleación donde se requiera):

Aleación/metal	Resistencia a la tensión (MPa)
1100-H18	165
5182-O	290
2024-T4	469
2090-T6	552
201-T6	483
ZK40A-T5	276
Cu-2% Be endurecida por envejecimiento	1310
Aleación alfa Ti	862
W	455
Ta	186

Sección 14-1 Aleaciones de aluminio

14-3 Los aceros estructurales han sido tradicionalmente empleados en la construcción de barcos; no obstante, con los crecientes costos del combustible, se desea hallar materiales alternativos de menor peso. Algunas de las propiedades clave requeridas para materiales en la construcción de barcos son su alta resistencia a la fluencia, alta resistencia a la corrosión y bajo costo. Discuta los beneficios y desventajas de las aleaciones de aluminio como sustitución para los aceros estructurales en barcos.

14-4 Suponiendo que la densidad siga sin cambio, compare la resistencia específica de la aleación 2090-T6 con respecto a la de una aleación de aluminio 443-F colada en matriz. Si usted consideró la densidad real, ¿piensa que la diferencia entre las resistencias específicas aumentaría o sería menor? Explique.

14-5 Explique por qué las aleaciones de aluminio que contienen más de alrededor de 15% de Mg no se usan.

14-6 ¿Esperaría usted que una aleación de aluminio 2024-T9 fuera más fuerte o más débil que una aleación 2024-T6? Explique.

14-7 Estime la resistencia a la tensión esperada para las siguientes aleaciones de aluminio:

- a) 1100-H14
- b) 5182-H12
- c) 3004-H16

14-8 Un cable de acero de 1 cm de diámetro, con resistencia a la fluencia de 480 MPa, debe ser reemplazado para reducir el peso total del cable. ¿Cuál de las siguientes aleaciones de aluminio podría ser un potencial sustituto?

- a) 3004-H18 ($S_y = 248$ MPa)
- b) 1100-H18 ($S_y = 151$ MPa)
- c) 4043-H18 ($S_y = 269$ MPa)
- d) 5182-O ($S_y = 131$ MPa)

La densidad del acero utilizado en el cable fue de 7.87 g/cm^3 , y suponga que la densidad de todas las aleaciones de aluminio citadas antes es de 2.7 g/cm^3 .

14-9 Suponga, por rápida solidificación desde el estado líquido, que una aleación sobresaturada de Al-7% Li puede ser producida y posteriormente envejecida. Compare la cantidad de β que se formará en esta aleación con respecto a la formada en una aleación 2090.

14-10 Determine la cantidad de $\text{Mg}_2\text{Al}_3(\beta)$ que se espera se forme en una aleación de aluminio 5182-O (véase la figura 14-2).

14-11 Una pieza hecha de aleación de aluminio 5182-O que había sido expuesta a agua salada presentó corrosión severa a lo largo de límites de granos. Explique esta observación con base en las fases esperadas a temperatura ambiente en esta aleación. (Véase la figura 14-2.)

Sección 14-2 Aleaciones de magnesio y berilio

14-12 De los datos de la tabla 14-6, estime la relación por la cual la resistencia a la fluencia del magnesio puede aumentar mediante aleación y tratamiento térmico y compare con la relación de aleaciones de aluminio.

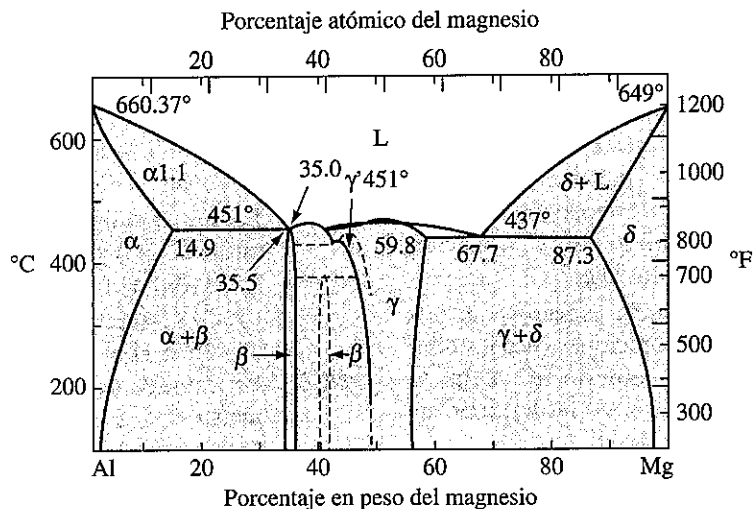


Figura 14-2 (Repetida para problemas 14-10 y 14-11.) Parte del diagrama de fases del aluminio-magnesio.

14-13 Suponga que una barra redonda de 24 pulg de largo ha de soportar una carga de 400 libras sin ninguna deformación permanente. Calcule el diámetro mínimo de la barra si está hecha de

- aleación de magnesio AZ80A-T5 y
- aleación de aluminio 6061-T6.

Calcule el peso de la barra y el costo aproximado (con base en Mg y Al puros) en cada caso.

14-14 Una varilla de 10 m de largo y 0.5 cm de diámetro debe alargarse no más de 2 mm bajo carga. Determine la fuerza máxima que se puede aplicar si la varilla está hecha de

- aluminio,
- magnesio y
- berilio.

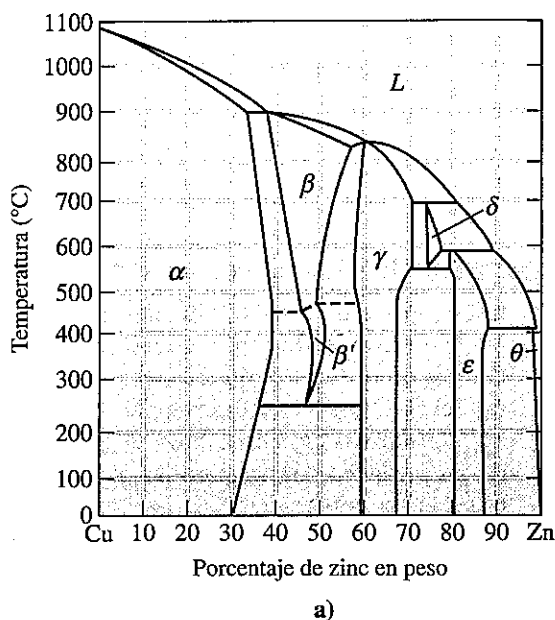


Figura 14-5 a) (Repetida para el problema 14-16.) Diagrama de fases binario para el sistema cobre-zinc.

Sección 14-3 Aleaciones de cobre

14-15 a) Explique cómo se hace el cobre puro. b) ¿Cuáles son algunas de las propiedades importantes del cobre? c) ¿Qué es el latón? d) ¿Qué es el bronce? e) ¿Por qué la Estatua de la Libertad es verde?

14-16 Se dice que el cobre puede contener hasta 40% de Zn o 9% de Al y todavía ser de una sola fase. ¿Cómo explica este enunciado con base en el diagrama de fases de la figura 14-5a)?

14-17 Compare el porcentaje de aumento en la resistencia a la fluencia de aluminio, magnesio y cobre recocidos comercialmente puros, por endurecimiento por deformación. Explique las diferencias observadas.

14-18 Se desea producir un bronce al aluminio templado y revenido que contenga 13% de Al. Recomiende un tratamiento térmico, inclu-

yendo temperaturas apropiadas. Calcule la cantidad de cada fase después de cada paso del tratamiento.

- 14-19** Diversas aleaciones de fundición tienen un alto contenido de plomo; no obstante, el contenido de Pb en aleaciones forjadas es comparativamente bajo. ¿Por qué no se agrega más plomo a las aleaciones forjadas? ¿Qué precauciones deben tomarse cuando una aleación de plomo forjada se trabaja en caliente o recibe un tratamiento térmico?

- 14-20** ¿Esperaría usted que la resistencia a fracturas en aluminio al bronce templado y revenido fuera alta o baja? ¿Habría diferencia en la resistencia de la aleación a la formación de grietas en comparación con el crecimiento de grietas? Explique.

Sección 14-4 Aleaciones de níquel y cobalto

- 14-21** Con base en la fotomicrografía de la figura 14-7a), ¿esperaría usted que el precipitado γ' o los carburos den mayor efecto de endurecimiento en superaleaciones a bajas temperaturas? Explique.

- 14-22** La densidad del Ni_3Al es de 7.5 g/cm^3 . Suponga que una aleación de Ni-5% en peso de Al se calienta de modo que todo el aluminio reacciona con el níquel para producir Ni_3Al . Determine el porcentaje en volumen del precipitado Ni_3Al en la matriz de níquel.

Sección 14-5 Aleaciones de titanio

- 14-23** Cuando el acero se une usando soldadura por arco, sólo la zona de fusión líquida debe ser protegida por un gas o flujo. Cuando se

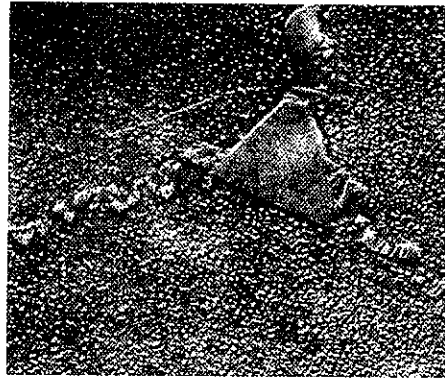


Figura 14-7 a) (Repetida para el problema 14-21.) Microestructura de una superaleación con carburos en los límites de granos y precipitados γ' en la matriz ($15\,000\times$). (De ASM Handbook, vol. 9, *Metallography and Microstructure* (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.)

sueda titanio, el lado delantero y el trasero del metal soldado deben protegerse. ¿Por qué deben tomarse estas precauciones adicionales al unir titanio?

- 14-24** Una aleación de Ti-15% V y una aleación de Ti-35% V se calientan a la temperatura más baja a la que se forma apenas sólo β . A continuación se templan y recalientan a 300°C . Describa los cambios en la microestructura durante el tratamiento térmico para cada una de las aleaciones, incluyendo la cantidad de cada fase. ¿Cuál es la matriz y cuál es el precipitado en cada caso? ¿Cuál es un proceso de endurecimiento por envejecimiento? ¿Cuál es un proceso de templado y revenido? [Véase la figura 14-12a).]

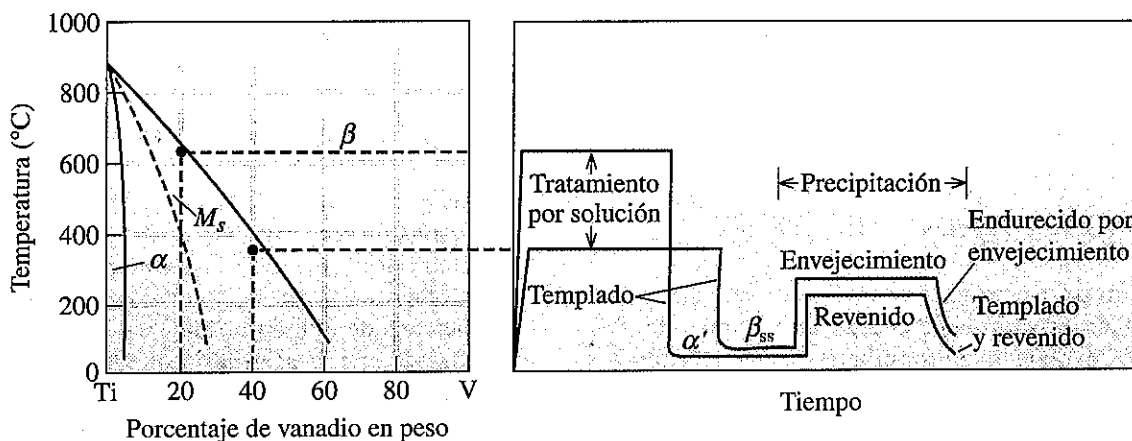


Figura 14-12 (Repetida para el problema 14-24.) Tratamiento térmico de las aleaciones de titanio α - β .

- 14-25** Determine la resistencia específica de las aleaciones más fuertes de Al, Mg, Cu, Ti y Ni. En sus cálculos, use las densidades de los metales puros, en lb/in³. Trate de explicar su orden.
- 14-26** Con base en los diagramas de fases, estime las solubilidades de Ni, Zn, Al, Sn y Be en cobre a temperatura ambiente. ¿Estas solubilidades son esperadas en vista de las condiciones de Hume-Rothery para la solubilidad sólida? Explique.

Sección 14-6 Metales refractarios y preciosos

- 14-27** ¿Qué es un metal o una aleación refractaria? ¿Qué es un metal precioso?
- 14-28** La temperatura de una pieza de tungsteno con recubrimiento se aumenta. ¿Qué ocurre cuando el recubrimiento protector en una pieza de tungsteno se expande más que el tungsteno? ¿Qué pasa cuando el recubrimiento protector en una pieza de tungsteno se expande menos que el tungsteno?
- 14-29** ¿Para qué aplicaciones se usan Pt, Rh, Pd y Ag?
- 14-30** Se emplean nanopartículas (3 nm de diámetro) de platino (Pt) con un peso total de 1 miligramo en convertidores catalíticos de automóviles, para facilitar las reacciones de oxidación. Como el Pt es un metal costoso, se está explorando un método para recubrir nanopartículas de hierro (Fe) para reducir el costo del metal catalítico. Si partículas de Fe de 3 nm de diámetro se están recubriendo con 1 nm de Pt para obtener la misma área superficial efectiva con menos partículas y menos Pt, calcule la diferencia en costo y peso del catalizador. Suponga que el costo del Pt es de \$40/g y el del Fe es de \$0.005/g. La densidad del Fe es de 7.87 g/cm³ y la del Pt es de 21.45 g/cm³.



Problemas de diseño

- 14-31** Una pieza para el soporte de un motor para un avión privado debe ocupar un volumen de 60 cm³, con un grosor mínimo de 0.5 cm y un ancho mínimo de 4 cm. La carga en la pieza durante el servicio debe ser hasta de 75 000 N. Se espera que la pieza permanezca por debajo de 100 °C durante el servicio. Diseñe un mate-

rial y su tratamiento que funcione de manera satisfactoria en esta aplicación.

- 14-32** Usted desea diseñar el peldaño de una escalera. Ésta debe ser de peso ligero para que se pueda transportar y usar fácilmente. Los peldaños de la escalera deben medir 0.25 × 1 pulg y medir 12 pulg de largo. Diseñe un material y su procesamiento para los peldaños.
- 14-33** Se ha determinado que se necesita una aleación que tenga una densidad de 2.3 ± 0.05 g/cm³ que debe ser fuerte, pero también tener ductilidad. Diseñe un material y su procesamiento que pudiera satisfacer estos requisitos.
- 14-34** Se desea diseñar un aparato de montaje que posicione y apunte un láser para corte de precisión de un material compuesto. ¿Qué requisitos de diseño podrían ser importantes? Diseñe un material y su procesamiento que pudiera satisfacer estos requisitos.
- 14-35** Diseñe una aleación de níquel-titanio que produzca un precipitado de 60% en volumen de Ni₃Ti en una matriz pura de níquel.
- 14-36** Una palanca activadora en un aparato eléctrico debe abrir y cerrar casi instantáneamente y portar una carga alta cuando se cierre. ¿Qué requisitos de diseño deben ser importantes para esta aplicación? Diseñe un material y su procesamiento para satisfacer estos requisitos.
- 14-37** Un aspa de ventilador en una planta de productos químicos debe operar a temperaturas de hasta 400 °C bajo condiciones más bien corrosivas. En ocasiones, material sólido se incrusta e impacta en el ventilador. ¿Qué requisitos de diseño serían importantes? Diseñe un material y su procesamiento para esta aplicación.



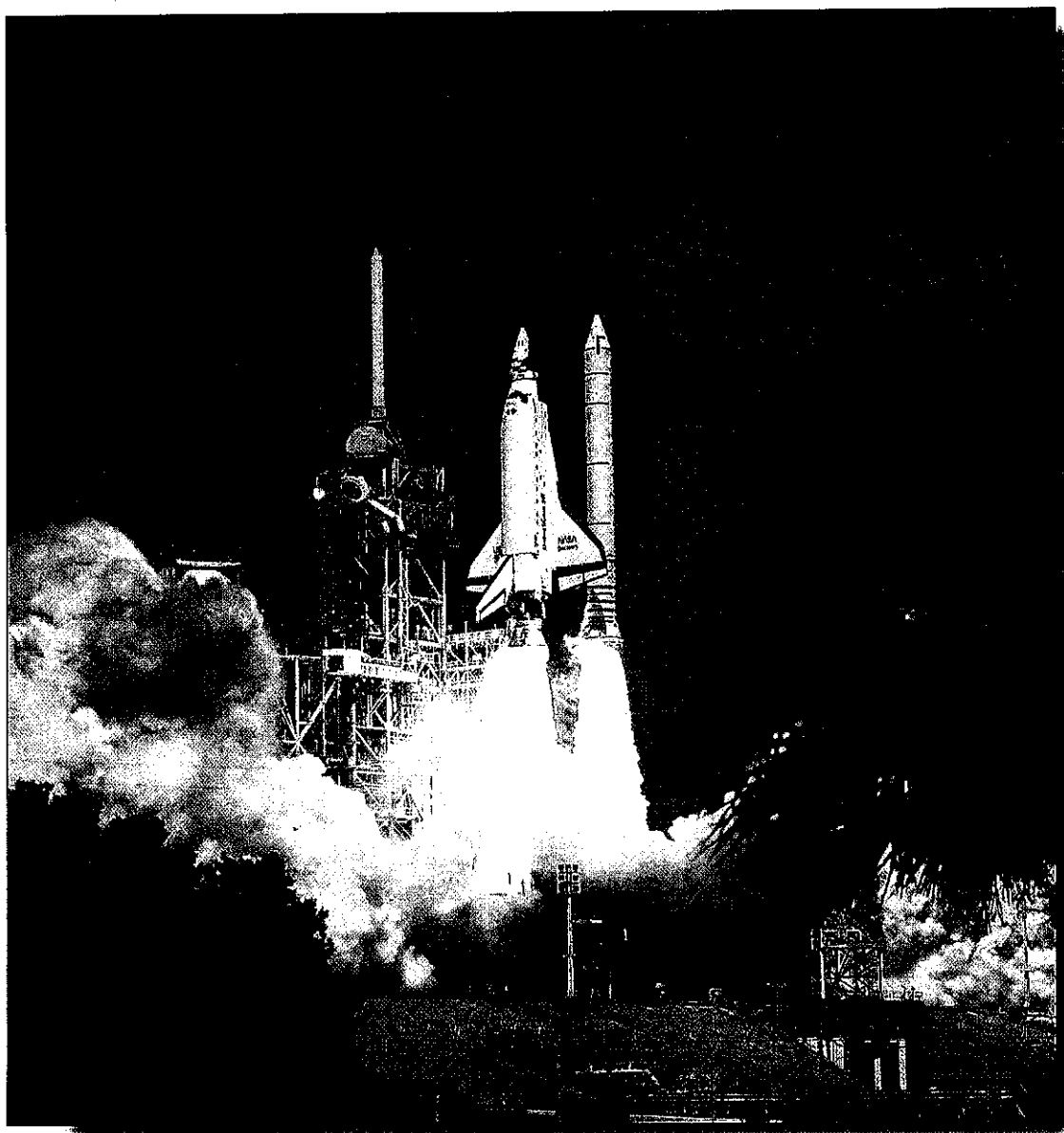
Problemas de cómputo

- 14-38** Sistema de identificación de bases de datos para aleaciones. Escriba un programa de computadora que pida al usuario ingresar un código de tres o de cuatro dígitos para aleaciones de aluminio (tabla 14-3). Usted tendrá que pedir al usuario que le proporcione un dígito a la vez o calcular una forma de comparar diferentes dígitos en fila. Esto será seguido por una letra y un número (por ejemplo T y 4).

El programa debe entonces dar al usuario alguna información más detallada acerca del tipo de aleación. Por ejemplo, si el usuario ingresa 2024 y luego T4, el programa debe dar una salida que especifique que a) la aleación es de tipo forjado, b) Cu es el principal elemento de aleación (porque el primer dígito es 2) y c) es naturalmente envejecido. No haga el programa demasiado complejo. La idea principal aquí es que usted vea cómo se diseñan bases de datos para aleaciones.

Knovel® Problemas

- K14-1** No todas las aleaciones de aluminio se pueden soldar fácilmente. Dé unas pocas designaciones de aleaciones de aluminio que se puedan soldar con facilidad. Haga una lista de algunas técnicas recomendadas de soldadura para aleaciones de aluminio.
- K14-2** Haga una lista de varias aleaciones de aluminio forjado con resistencias a la tensión entre 10-15 ksi.



Los productos cerámicos desempeñan una función de importancia decisiva en una amplia variedad de tecnologías relacionadas con la electrónica, el magnetismo, la óptica y la energía. Numerosos materiales cerámicos avanzados juegan un papel muy importante para dar aislamiento térmico y propiedades a alta temperatura. Las aplicaciones de los materiales cerámicos avanzados van desde tarjetas de crédito, cajas para chips de silicio, losetas para el transbordador espacial, imágenes médicas y fibras ópticas que hacen posible las comunicaciones, así como vidrios seguros y eficientes en cuanto a energía se refiere. Los materiales cerámicos tradicionales sirven como refractarios para el procesamiento de metales y para aplicaciones de consumidores. *(Imagen cortesía de la NASA.)*

Materiales cerámicos

¿Se ha preguntado alguna vez?

- ¿De qué está hecha la cinta magnética de una tarjeta de crédito?
- ¿Qué material se usa para proteger el transbordador espacial de las altas temperaturas durante su reingreso a la Tierra?
- ¿Qué material cerámico se agrega por lo general a las pinturas?
- ¿Qué material cerámico se encuentra en huesos y dientes?
- ¿De qué están hechas las bujías?
- ¿Hay cerámica en la leche procesada?
- ¿Cuál gema de cerámica es el material más duro que se presenta en la naturaleza?

El objetivo de este capítulo es examinar más de cerca la síntesis, el procesamiento y las aplicaciones de los materiales **cerámicos**. Estos materiales se han utilizado durante muchos miles de años; casi todos ellos exhiben buena resistencia a la compresión, pero prácticamente no presentan ductilidad bajo tensión. La familia de los materiales cerámicos incluye materiales inorgánicos policristalinos y monocristalinos, vidrios inorgánicos y vidrios-cerámicos. En capítulos anteriores se han estudiado muchos de estos materiales.

En los capítulos 2 y 3 se aprendió lo relacionado con los enlaces en materiales cerámicos, las estructuras cristalinas de materiales cerámicos tecnológicamente útiles y las distribuciones de iones en vidrios. Se inicia con una exposición que resume la clasificación y las aplicaciones de los materiales cerámicos.

15-1 Aplicaciones de materiales cerámicos

Existen muchas formas distintas de clasificar los materiales cerámicos. Una de ellas es definirlos con base en la clase de sus compuestos químicos (por ejemplo, óxidos, carburos, nitruros, sulfuros, fluoruros, etc.). Otra forma, que se utilizará aquí, es clasificar los materiales cerámicos según su función principal (tabla 15-1).

Los materiales cerámicos se utilizan en una amplia gama de tecnologías como refractarios, bujías, dieléctricos en capacitores, sensores, abrasivos, medios de grabación magnética, etc. El transbordador espacial utiliza ~25 000 losetas cerámicas ligeras, reutilizables y muy porosas, que protegen al fuselaje de aluminio del calor generado durante el reingreso en la atmósfera terrestre. Estas losetas están fabricadas de fibra de sílice de alta pureza y sílice coloidal recubierta con un vidrio de silicato de boro. Los materiales cerámicos también pueden aparecer en la naturaleza en forma de óxidos o como materiales naturales; el cuerpo humano tiene la capacidad asombrosa de fabricar hidroxiapatita, un material que se encuentra en los huesos y en los dientes. Los materiales cerámicos se utilizan también como recubrimientos. Los **vidriados** son recubrimientos cerámicos aplicados a objetos de vidrio; los **esmaltes** son recubrimientos cerámicos aplicados a objetos metálicos. Siga la clasificación que aparece en la tabla 15-1 y anote las diferentes aplicaciones. La alúmina y la sílice son los materiales cerámicos de mayor uso y, como se observará, existen numerosas aplicaciones en una lista en dicha tabla que dependen del uso de esos dos materiales cerámicos.

A continuación aparece un breve resumen de las aplicaciones de algunos de los materiales cerámicos de más amplio uso:

- **Alúmina** (Al_2O_3) se utiliza para contener metales fundidos o en las aplicaciones donde el material debe operar a altas temperaturas, pero donde también se requiere una elevada resistencia. La alúmina también se utiliza como un sustrato con una constante dieléctrica reducida para receptáculos o empaques electrónicos que alojan chips de silicio. Una aplicación clásica es en los aisladores de las bujías. También se han encontrado algunas aplicaciones únicas para uso médico y dental. La alúmina contaminada con cromo se utiliza para fabricar aparatos de rayos láser. También se utilizan finas partículas de alúmina como soportes de catalizadores.
- El **diamante** (C) es el material más duro que existe en la naturaleza. Los diamantes industriales se utilizan como abrasivos para pulverizar y pulir. Mediante procesos de depósitos químicos al vapor, se preparan los recubrimientos de diamante y materiales tipo diamante resistentes a la abrasión, para muchas aplicaciones diferentes, por ejemplo herramientas de corte. También es, por supuesto, utilizado en joyería.
- La **sílice** (SiO_2) es posiblemente el material cerámico de más uso; es el ingrediente esencial de los vidrios y de muchos otros materiales vidrios-cerámicos. Los materiales basados en la sílice se usan en aislamientos térmicos, refractarios, abrasivos, como compuestos reforzados con fibras, cristalería para laboratorio, etc. En forma de fibras largas continuas, la sílice se utiliza para la fabricación de fibras ópticas en comunicaciones. Polvos hechos que usan partículas finas de sílice se emplean en neumáticos, pinturas y muchas otras aplicaciones.
- El **carburo de silicio** (SiC) tiene una extraordinaria resistencia a la oxidación a temperaturas incluso por arriba del punto de fusión del acero. El SiC se usa con frecuencia como recubrimiento para metales, materiales compuestos de carbono-carbono y otros materiales cerámicos, para protegerlos a esas temperaturas extremas; también se utiliza como abrasivo en las ruedas rectificadoras y como un particulado y refuerzo fibroso tanto en matrices metálicas como en matrices de materiales compuestos. Asimismo, se utiliza para la fabricación de elementos calefactores para hornos. El carburo de silicio es semiconductor y muy buen candidato para dispositivos electrónicos a altas temperaturas.

TABLA 15-1 ■ Clasificación funcional de cerámicas*

Función	Aplicación	Ejemplos de cerámicas
Eléctrica	Dieléctricos para condensadores y para microondas	BaTiO ₃ , SrTiO ₃ , Ta ₂ O ₅ Ba(Mg _{1/3} Ta _{2/3})O ₃ , Ba(Zn _{1/3} Ta _{2/3})O ₃ BaTi ₄ O ₉ , Ba ₂ Ti ₉ O ₂₀ , Zr _x Sn _{1-x} TiO ₄ , Al ₂ O ₃
	Óxidos conductores	SnO ₂ (ITO) dopado con In
	Superconductores	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} (YBCO)
	Encapsulados eléctricos	Al ₂ O ₃
	Aisladores	Porcelana
	Celdas de combustible de óxido sólido	ZrO ₂ , LaCrO ₃
	Piezoelectrónica	Pb(Zr _x Ti _{1-x})O ₃ (PZT), Pb(Mg _{1/3} Nb _{2/3})O ₃
	Electroóptica	PLZT, LiNbO ₃
	Magnética	γ-Fe ₂ O ₃ , CrO ₂ (casetes de "cromo")
	Ferrolíquidos, tarjetas de crédito	Fe ₃ O ₄
Óptica	Circuladores, aisladores	Ferrita al níquel-zinc
	Inductores, imanes	Ferrita al manganeso-zinc
	Fibras ópticas	Dopado con SiO ₂
Automotriz	Vidrios	Base de SiO ₂
	Láseres	Al ₂ O ₃ , almandinato de itrio y aluminio (YAG)
	Iluminación	Al ₂ O ₃ , vidrios
Mecánica/estructural	Sensores de oxígeno, celdas de combustible	ZrO ₂
	Soporte catalítico	Cordierita
	Bujías	Al ₂ O ₃
Biomédica	Neumáticos	SiO ₂
	Parabrisas/ventanas	Vidrios base de SiO ₂
	Herramientas de corte	WC-Co cerámicas Silicio-aluminio-oxiniruro (Sialon) Al ₂ O ₃
Construcción	Materiales compuestos	Fibras de vidrio de sílice, SiC, Al ₂ O ₃
	Abrasivos	SiC, Al ₂ O ₃ , diamante, BN, ZrSiO ₄
	Implantes	Hidroxiapatita
Otras	Odontología	Porcelana, Al ₂ O ₃
	Imágenes de ultrasonido	PZT
	Edificios	Concreto Vidrio Muebles sanitarios
Química	Aplicaciones militares	PZT, B ₄ C
	Materiales para blindajes	
	Sensores	SnO ₂
Doméstica	Nuclear	UO ₂
	Procesamiento de metales	Vidrios para eliminación de desechos Refractarios basados en alúmina y en sílice, sensores de oxígeno, moldes de fundición, etc.
	Catalizadores	Óxidos varios (Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , ZnO, TiO ₂)
Doméstica	Filtración de aire y líquidos	
	Sensores	
	Pinturas, hules	
Doméstica	Azulejos, muebles para baño, línea blanca, utensilios para cocina, alfarería, artes, joyas	Arcilla, alúmina y cerámicas basadas en sílice, vidrios-cerámicos, diamante, rubí, zirconia cúbica y otros cristales

*Los acrónimos se indican con letra cursiva.

- El *nitruro de silicio* (Si_3N_4) tiene propiedades parecidas a las del SiC , aunque su resistencia a la oxidación y su resistencia a altas temperaturas es un poco menor. Tanto el nitruro de silicio como el carburo de silicio son posibles candidatos para componentes para motores de automóvil y turbinas de gas, ya que permiten temperaturas de operación más elevadas y mejores eficiencias en el combustible con menos peso que los metales y las aleaciones tradicionales.
- El *dióxido de titanio* (TiO_2) se utiliza para la fabricación de materiales cerámicos electrónicos como el BaTiO_3 ; sin embargo, su uso más extenso es en forma de pigmento blanco para la fabricación de pinturas y blanquear la leche. El titanio se utiliza en ciertos vidrios-cerámicos como agente de formación de núcleos. Se utilizan pequeñas partículas de TiO_2 para fabricar lociones bronceadoras que sirven de protección contra los rayos ultravioleta.
- La *zirconia* (ZrO_2) se usa para fabricar muchos otros materiales cerámicos como el zirconio. También se usa para fabricar sensores del gas oxígeno utilizados en los automóviles y para medir el oxígeno disuelto en los aceros líquidos. La zirconia se utiliza como aditivo en muchos materiales cerámicos electrónicos, así como material refractario. La forma cúbica de los cristales individuales de zirconia se utiliza para hacer artículos de joyería.

15-2 Propiedades de materiales cerámicos

Las propiedades de algunos materiales cerámicos aparecen resumidas en la tabla 15-2. En la tabla 15-3 se resumen las propiedades mecánicas de algunos materiales cerámicos estructurales.

Tome nota de las elevadas temperaturas de fusión y de las altas resistencias a la compresión de los materiales cerámicos. Como se menciona en el capítulo 6, el peso de todo un carro de bomberos puede ser soportado por cuatro tazas cafeteras de material cerámico. También se debe recordar que los valores de la resistencia a la tensión y a la flexión muestran variaciones considerables, ya que la resistencia de los materiales cerámicos depende de la distribución de los tamaños de las imperfecciones y no se ve afectada por los movimientos de dislocaciones. En el capítulo 7 se analiza la distribución de Weibull y la resistencia de los materiales cerámicos y de los vidrios. También observe que, contra lo que se piensa comúnmente, los materiales cerámicos no siempre son frágiles. A rapidez de deformación más lentas y a elevadas temperaturas, muchos materiales cerámicos con un tamaño de grano muy fino realmente muestran un comportamiento superplástico.

TABLA 15-2 ■ Propiedades de materiales cerámicos policristalinos que se encuentran comúnmente

Material	Punto de fusión (°C)	Coefficiente de expansión térmica ($\times 10^{-6}$ cm/cm)/°C	Dureza Knoop (HK) (100 g)
Al_2O_3	2000	~6.8	2100
BN	2732	0.57 ^a , -0.46 ^b	5000
SiC	2700	~3.7	2500
Diamante		1.02	7000
Mulita	1810	4.5	—
TiO_2	1840	8.8	—
ZrO_2 cúbica	2700	10.5	—

^aPerpendicular a la dirección de presión.

^bParalela a la dirección de presión.

TABLA 15-3 ■ Propiedades mecánicas de materiales cerámicos avanzados seleccionados

Material	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia a la flexión (psi)	Resistencia a la compresión (psi)	Módulo de Young (psi)	Tenacidad a la fractura (psi√pulg)
Al ₂ O ₃	3.98	30 000	80 000	400 000	56 × 10 ⁶	5 000
SiC (sinterizado)	3.1	25 000	80 000	560 000	60 × 10 ⁶	4 000
Si ₃ N ₄ (unido por reacción)	2.5	20 000	35 000	150 000	30 × 10 ⁶	3 000
Si ₃ N ₄ (prensado en caliente)	3.2	80 000	130 000	500 000	45 × 10 ⁶	5 000
Sialon	3.24	60 000	140 000	500 000	45 × 10 ⁶	9 000
ZrO ₂ (parcialmente estabilizado)	5.8	65 000	100 000	270 000	30 × 10 ⁶	10 000
ZrO ₂ (con tenacidad mejorada por transformación)	5.8	50 000	115 000	250 000	29 × 10 ⁶	11 000

15-3 Síntesis y procesamiento de polvos cerámicos

Los materiales cerámicos se funden a altas temperaturas y presentan un comportamiento frágil a la tensión. En consecuencia, el moldeo y el procesamiento termomecánico, ampliamente utilizados para metales, aleaciones y termoplásticos, no pueden ser aplicados al procesar los materiales cerámicos. Sin embargo, los vidrios inorgánicos utilizan temperaturas de fusión más bajas, gracias a la formación de eutécticos en el proceso de vidrio flotado (que se estudia en la sección 15-5). En vista de que la fusión, el moldeo y el procesamiento termomecánico no son opciones viables para los materiales cerámicos policristalinos, generalmente se procesan los materiales cerámicos en formas útiles a partir de polvos cerámicos. Un **polvo** es un conjunto de partículas finas. El paso de fabricación de un polvo cerámico se define aquí como la **síntesis** de los materiales cerámicos. Se parte de un polvo cerámico y se prepara con el fin de formarlo mediante triturado, molido, separación de impurezas, mezclado de polvos diferentes, secado, **secado por aspersión** para formar aglomerados blandos. Posteriormente, se utilizan varias técnicas diferentes, como compactación, **fundición en cinta**, extrusión y **moldeo por escurrimiento**, para convertir polvos correctamente procesados a la forma deseada, conocida como **cerámica verde**. Una cerámica verde es un material cerámico que todavía no se ha sinterizado. Los pasos para la conversión de un polvo cerámico (o de la mezcla de polvos) en una forma útil se conoce como **procesamiento de los polvos**. La cerámica verde se consolida a continuación, utilizando un tratamiento de alta temperatura conocido como **sinterizado** o quemado. En este proceso, se calienta la cerámica verde a una temperatura elevada, utilizando un tratamiento térmico con atmósfera controlada, a fin de obtener un material denso. El material cerámico se somete después a operaciones adicionales como el rectificado, pulido o maquinado, según se requiera para la aplicación final. En algunos casos, se fijarán terminales, se depositarán electrodos o recubrimientos. Estos pasos, que en general se encuentran en la síntesis y en el procesamiento de los materiales cerámicos, se resumen en la figura 15-1.

A los polvos cerámicos elaborados utilizando técnicas convencionales o químicas se les da forma mediante las técnicas que se muestran en la figura 15-2. Se insiste en que se utilizan procesos muy similares para el procesamiento de los polvos metálicos y de aleaciones, una ruta conocida como **metalurgia de polvos**. Los polvos están formados por partículas poco unidas, y el procesamiento de los polvos comprende la consolidación de los mismos en una forma deseada. A menudo, los polvos cerámicos preparados deben convertirse en aglomerados blandos rociando una lechada de polvo a través de una tobera en una cámara (secado por aspersión) en presencia de aire caliente. Este proceso lleva a la formación de aglomerados blandos que fluyen dentro de moldes utilizados para la compactación de los polvos; esto se conoce como **secado por aspersión**.

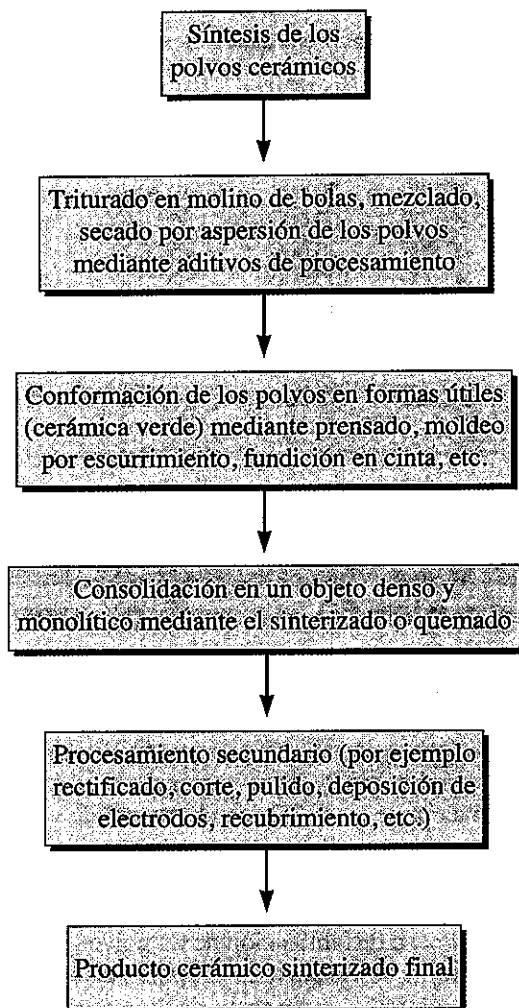


Figura 15-1
Pasos comunes del procesamiento de materiales cerámicos.

Compactación y sinterizado

Una de las maneras más eficientes económicamente para la producción de miles de formas más o menos sencillas, para piezas relativamente pequeñas (< 6 pulg), es la compactación y el sinterizado. Muchos materiales cerámicos electrónicos y magnéticos, herramientas de corte **cermet** (por ejemplo WC-Co) y otros materiales se procesan usando esta técnica. Los polvos finos pueden secarse por aspersión, formando aglomerados blandos que fluyen y se compactan bien. Los diferentes pasos de la compactación uniaxial, en la cual se aplica la fuerza de compactación en una sola dirección, se presentan en la figura 15-3a). Como un ejemplo, en la figura 15-3b) se muestra la microestructura de un material cerámico de tantalato de magnesio de bario (BMT) preparado utilizando compactación y sinterizado. El sinterizado abarca diferentes mecanismos de transporte de masa [figura 15-3c)]. La fuerza impulsora para el sinterizado es la reducción en el área superficial de un polvo (capítulo 5). Con el sinterizado, los límites de grano y la difusión volumétrica contribuyen a la densificación (aumento de la densidad). La difusión superficial y la condensación por evaporación pueden originar crecimiento del grano, pero no causan densificación.

El proceso de compactación se puede completar en un minuto para piezas más pequeñas; entonces, la compactación uniaxial es adecuada para producir un gran número de piezas pequeñas y sencillas. La compactación se utiliza para producir lo que se llama “cerámica verde”; ésta tiene una resistencia respetable y se le puede manipular y maquinar. En algunos casos, piezas muy grandes (de hasta unos pocos pies de diámetro y de seis a ocho pies

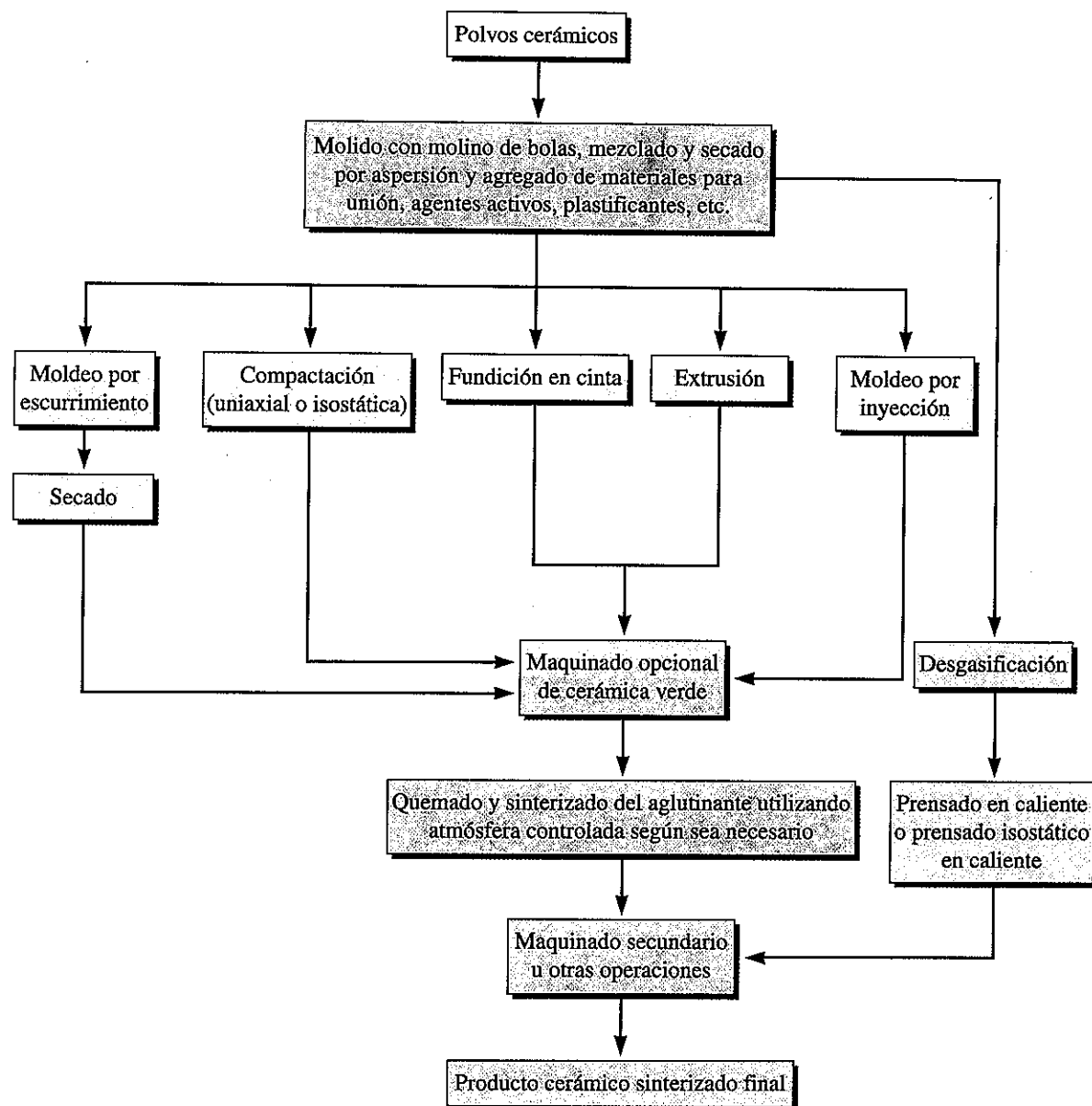


Figura 15-2 Diferentes técnicas para procesamiento de materiales cerámicos avanzados.

de largo) se pueden producir utilizando un proceso llamado **prensado isostático en frío (PIF)**, donde la presión se aplica utilizando aceite. Dichas piezas grandes son sinterizadas con o sin presión. El prensado isostático en frío se utiliza para obtener una mayor densidad en verde o cuando se requiere la compactación de piezas más complicadas.

En algunos casos, las piezas se pueden producir en condiciones en las que el sinterizado se realiza aplicando presión. Esta técnica, conocida como **prensado en caliente**, es utilizada para cerámicos refractarios y covalentes que no muestran un buen comportamiento en sinterizado sin presión. Del mismo modo, piezas grandes de metales y aleaciones que se compactan utilizando CIP se pueden sinterizar bajo presión en un proceso conocido como **prensado isostático en caliente (PIC)** (capítulo 5). En este proceso, la presión aplicada actúa en contra de la presión interna en los poros y mejora la densificación sin causar crecimiento de grano. La presión en caliente o presión isostática en caliente también se utiliza para producir piezas cerámicas o metálicas donde se requiere una porosidad mínima. Algunos procesos innovadores recientes, que utilizan microondas (de manera similar a como se calienta la

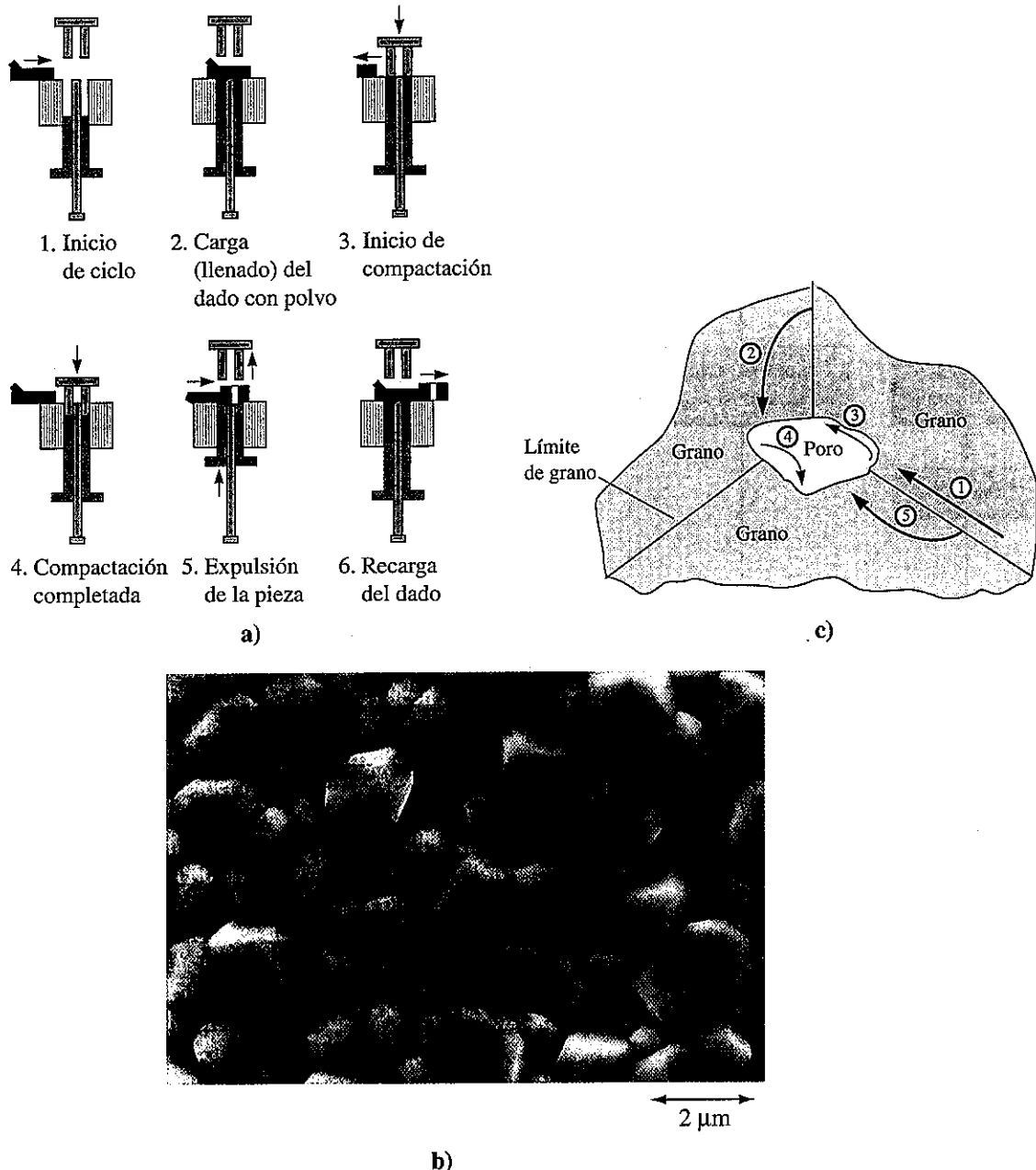


Figura 15-3 a) Compactación uniaxial de polvos que muestra el ensamble de troquel y dado durante diferentes etapas. Regularmente, en el caso de piezas pequeñas, estas etapas se completan en menos de un minuto. (De *Materials and Processes in Manufacturing, Eighth Edition*, por E.P. DeGarmo, J.T. Black y R.A. Koshe, fig. 16-4. © 1997 John Wiley & Sons, Inc. Reproducido con permiso de John Wiley & Sons, Inc.) b) Microestructura de un material cerámico de tantalato de magnesio de bario (BMT) preparado usando compactación y sinterizado. (Cortesía de Heather Shivey.) c) Diferentes mecanismos de difusión comprendidos en la sinterización. El límite de granos y difusión volumétrica (1, 2 y 5) hacia el cuello contribuyen a la densificación. La evaporación-condensación (4) y difusión de superficie (3) no contribuyen a la densificación. (De *Physical Ceramics: Principles for Ceramic Science and Engineering*, por Y.M. Chiang, D. Birnie y W.D. Kingery, fig. 5-40. © 1997 John Wiley & Sons, Inc. Reproducido con permiso de John Wiley & Sons, Inc.)

comida en un horno de microondas), también se han perfeccionado para el secado y sinterizado de materiales cerámicos.

Algunos productos cerámicos, tales como el nitruro de silicio (Si_3N_4), se producen por **enlace por reacción**. Se le da la forma deseada al silicio y entonces se hace reaccionar con nitrógeno para formar el nitruro. El enlace por reacción, que puede ser realizado a temperaturas más bajas, provee un mejor control dimensional comparado con el prensado en caliente; sin embargo, se obtienen densidades menores y propiedades mecánicas de menor calidad. Para efectos de comparación, el efecto del procesamiento en los productos cerámicos de nitruro de silicio se presenta en la tabla 15-4.

Fundición en cinta Para la producción de cintas cerámicas delgadas (~ 3 a $100 \mu\text{m}$) se utiliza una técnica conocida como **fundición en cinta**. Con ayuda de una hoja se deposita una lechada en un sustrato plástico. La cinta verde se somete entonces a sinterizado. Muchos paquetes electrónicos comercialmente importantes con base en sustratos de alúmina y millones de capacitores de titanato de bario se fabrican usando este tipo de proceso de fundición en cinta.

Moldeo por escurrimiento Esta técnica utiliza una lechada acuosa de polvo cerámico. El lodo, conocido como **barbotina**, se vacía en un molde de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (figura 15-4). Conforme el agua de la lechada empieza a salir por acción capilar, se forma una masa gruesa a lo largo de la pared del molde. Cuando se ha acumulado suficiente espesor del producto, se vacía el resto de la lechada (esto recibe el nombre de *fundición por drenaje*). También es posible seguir vaciando más lechada en el molde para formar una pieza sólida (esto se conoce como *fundición sólida*). Del mismo modo, es posible utilizar presión para inyectar la lechada en moldes poliméricos. A continuación, la cerámica verde se seca y se “quema” o sinteriza a alta temperatura. El moldeo por escurrimiento se utiliza extensamente para la manufactura de piezas de arte cerámico (figurillas y estatuas), fregaderos y otros muebles sanitarios de material cerámico.

Extrusión y moldeo por inyección Estas técnicas son populares para fabricar tubos, ladrillos, tejas para horno y aislantes. El proceso de extrusión utiliza una mezcla viscosa, de textura similar a la masa para pan, de partículas cerámicas que contienen un aglutinante y otros aditivos. Esta mezcla tiene la consistencia de la arcilla, misma que luego se introduce en una máquina de extrusión donde se mezcla muy bien en un molino de amasar, se corta, se pasa por un desaerador y, posteriormente, se inyecta en el dado de una máquina de extrusión, de la cual se obtiene una forma continua de cerámica verde. Esta forma se corta en longitudes apropiadas y después se seca y sinteriza. Las piezas de cerámica cordierita, que se usan en la fabricación de las estructuras en forma de panal de los convertidores catalíticos, también se elaboran utilizando el proceso de extrusión.

El **moldeo por inyección** de los materiales cerámicos es similar al moldeo por inyección de polímeros (capítulo 16). Los polvos cerámicos se mezclan con un plastificante termoplástico y otros aditivos. Esta mezcla se pasa a continuación por un extrusor y se inyecta en un dado. Este método de inyección es el más adecuado para la elaboración de formas complejas. El polímero existente en el material cerámico moldeado por inyección se elimina por calor (quemado), y lo que queda del cuerpo cerámico se sinteriza a alta temperatura.

TABLA 15-4 ■ Propiedades del Si_3N_4 procesado usando técnicas diferentes

Proceso	Resistencia a la compresión (psi)	Resistencia a la flexión (psi)
Moldeo por escurrimiento	20 000	10 000
Prensado en caliente	112 000	30 000
Unión de reacción	50 000	125 000

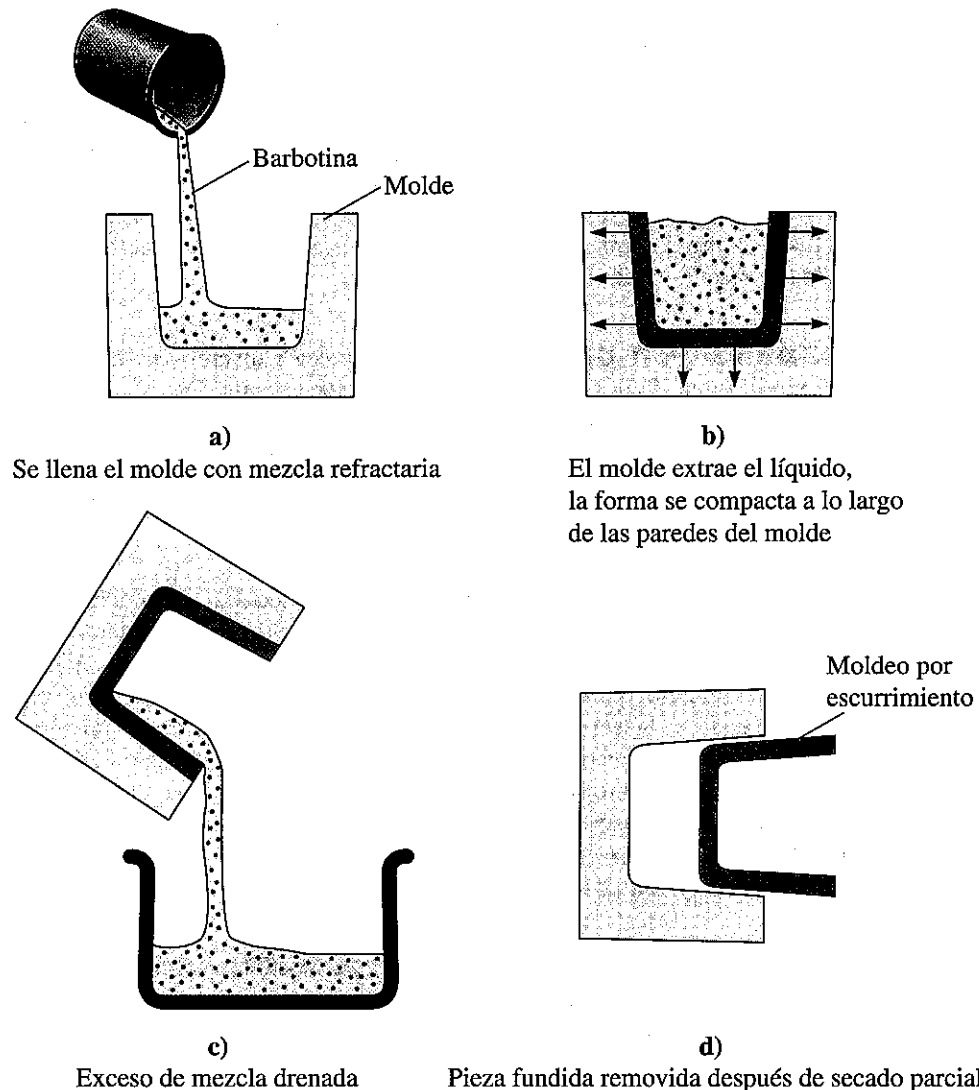


Figura 15-4 Pasos en moldeo por escurrimiento de cerámicas. (Fuente: Modern Ceramic Engineering, por D.W. Richerson, p. 462, fig. 10-34. Derechos de autor © 1992 Marcel Dekker. Reimpreso con permiso.)

15-4 Características de los materiales cerámicos sinterizados

En el caso de los materiales cerámicos sinterizados, son importantes el tamaño promedio del grano, la distribución del tamaño del grano y el nivel y tipo de porosidad. Del mismo modo, dependiendo de la aplicación, también deben considerarse las segundas fases en los límites de grano y los efectos de la orientación (debidos a la extrusión).

Granos y límites de grano Con frecuencia, el tamaño promedio del grano está íntimamente relacionado con el tamaño de la partícula primaria. Una excepción a lo anterior es cuando se presenta el crecimiento de grano debido a largos tiempos de sinterizado o a un crecimiento exagerado o anormal del grano (capítulo 5). Generalmente, los productos cerámicos con pequeño tamaño de grano son más fuertes que los cerámicos de grano grueso.

Tamaños más finos de grano ayudan a reducir los esfuerzos que se desarrollan en los límites de grano debido a expansión y contracción anisotrópicas. En general, partiendo de materias primas cerámicas más finas se produce un tamaño más fino de grano. Las propiedades magnéticas, dieléctricas y ópticas de los materiales cerámicos dependen del tamaño promedio del grano y, en esas aplicaciones, el tamaño del grano debe controlarse de manera adecuada. Aun cuando no se ha analizado aquí lo anterior en más detalle, en ciertas aplicaciones es importante utilizar cristales individuales de materiales cerámicos, con la finalidad de evitar los nocivos límites de grano que están siempre presentes en los materiales cerámicos policristalinos.

Porosidad Los poros representan el defecto de mayor importancia presente en los materiales cerámicos policristalinos. La presencia de poros suele ser perjudicial para las propiedades mecánicas de los materiales cerámicos en bloque, en vista de que dichos poros son una localización preexistente a partir de la cual puede crecer una grieta. La presencia de poros es una de las razones por las cuales los materiales cerámicos muestran un comportamiento tan frágil bajo carga de tensión. Dado que existe una distribución de tamaños de poros, y el nivel general de porosidad se modifica, por lo que varían las propiedades mecánicas de estos materiales. Esta variación se mide utilizando la estadística de Weibull (capítulo 7). La presencia de poros, por otra parte, puede resultar de utilidad para incrementar la resistencia al impacto térmico. En ciertas aplicaciones, como en filtros para metales o para líquidos o gases calientes, es deseable la presencia de poros interconectados.

En un material cerámico, los poros pueden estar interconectados o cerrados. La **porosidad aparente** mide los poros interconectados y determina la permeabilidad, es decir, la facilidad con la que los gases y los fluidos pasan a través del componente cerámico. La porosidad aparente se determina pesando el material cerámico seco (W_d) y volviendo a pesarlo tanto después de haber estado suspendido en agua (W_w) como después de haber sido retirado de la misma (W_s). Utilizando unidades de gramos y cm^3 :

$$\text{Porosidad aparente} = \frac{W_w - W_d}{W_w - W_s} \times 100 \quad (15-1)$$

La **porosidad verdadera** incluye tanto los poros interconectados como los no interconectados o cerrados. La porosidad verdadera o real, que se correlaciona mejor con las propiedades del material cerámico es:

$$\text{Porosidad verdadera} = \frac{\rho - B}{\rho} \times 100 \quad (15-2)$$

donde

$$B = \frac{W_d}{W_w - W_s} \quad (15-3)$$

B es la **densidad volumétrica**, y ρ es la densidad verdadera o gravedad específica del material cerámico. La densidad volumétrica es la masa del material cerámico dividido entre su volumen. El siguiente ejemplo ilustra la forma en que se determinan los niveles de porosidad en materiales cerámicos.

Ejemplo 15-1 Materiales cerámicos de carburo de silicio

Las partículas de carburo de silicio se compactan y se queman a elevadas temperaturas para producir una fuerte forma cerámica. La gravedad específica del SiC es 3.2 g/cm^3 . Posteriormente, la forma cerámica se pesa cuando está seca (360 g), después de sumergirla en agua (385 g) y mientras se encuentra suspendida en ella (224 g). Calcule la porosidad aparente, la porosidad verdadera y el porcentaje de volumen de poros cerrados.

SOLUCIÓN

$$\text{Porosidad aparente} = \frac{W_w - W_d}{W_w - W_s} \times 100 = \frac{385 - 360}{385 - 224} \times 100 = 15.5\%$$

$$\text{Densidad volumétrica} = B = \frac{W_d}{W_w - W_s} = \frac{360}{385 - 224} = 2.24 \text{ g/cm}^3$$

Nótese que el denominador es numéricamente igual al volumen del producto cerámico, dado que la densidad del agua es 1 g/cm³.

$$\text{Porosidad verdadera} = \frac{\rho - B}{\rho} \times 100 = \frac{3.2 - 2.24}{3.2} \times 100 = 30\%$$

El porcentaje de poros cerrados es la porosidad verdadera menos la porosidad aparente, o sea $30 - 15.5 = 14.5\%$. Entonces,

$$\text{Fracción de poros cerrados} = \frac{14.5}{30} = 0.483$$

15-5 Vidrios inorgánicos

En el capítulo 3, se analizó a los materiales amorfos y el concepto de orden de corto alcance contra orden de largo alcance en términos de arreglos atómicos o iónicos en materiales no cristalinos. Los más importantes de los materiales no cristalinos son los vidrios, en especial los basados en sílice. Naturalmente, existen vidrios basados en otros compuestos (como sulfuros, fluoruros y otras aleaciones diversas). Un **vidrio** es un material metaestable que se ha endurecido y se ha hecho rígido sin cristalizar. En cierta forma, un vidrio se parece a un líquido subenfriado. Por debajo de la **temperatura T_g de transición vítrea** (figura 15-5), la rapidez de

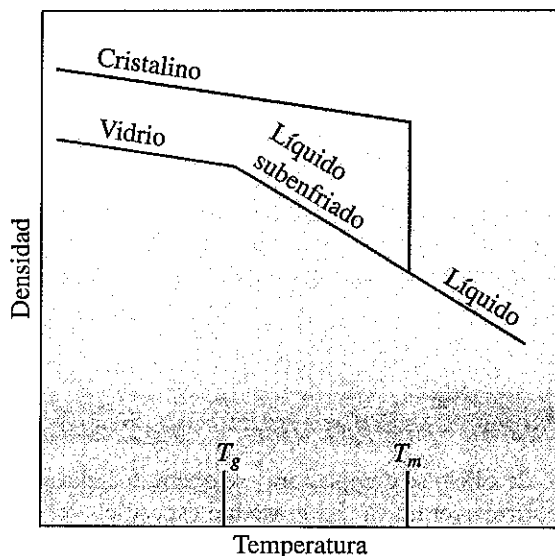


Figura 15-5

Cuando la sílice se cristaliza al enfriarse, se observa un cambio abrupto en la densidad. Sin embargo, en el caso de sílice vidriosa, el cambio en la pendiente de la temperatura de transición vítrea indica la formación de un vidrio a partir de un líquido subenfriado. El vidrio no tiene T_m o T_g fijas. Los materiales cristalinos tienen T_m fija y no tienen T_g .

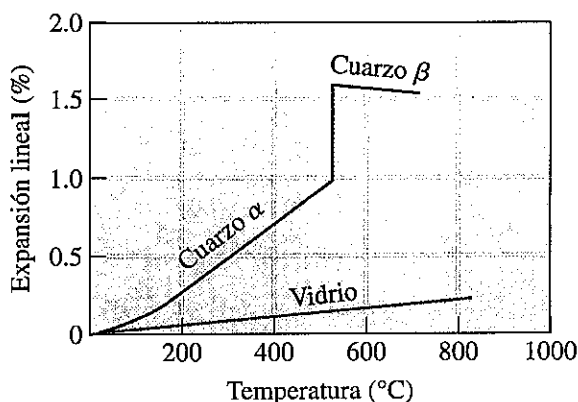


Figura 15-6

Expansión del cuarzo. Además de la expansión normal, casi lineal, una expansión grande y abrupta acompaña a la transformación del cuarzo α en β . Los vidrios se expanden de manera uniforme.

TABLA 15-5 ■ División de los óxidos en formadores, intermedios y modificadores de vidrio

Formadores de vidrio	Intermedios	Modificadores
B ₂ O ₃	TiO ₂	Y ₂ O ₃
SiO ₂	ZnO	MgO
GeO ₂	PbO ₂	CaO
P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	PbO
V ₂ O ₃	BeO	Na ₂ O

contracción volumétrica se reduce y el material puede considerarse como un “vidrio”, en lugar de un “líquido subenfriado”. Al unir tetraedros de sílice u otros grupos iónicos se obtiene una estructura de red sólida, pero no cristalina (capítulo 3).

Vidrios de silicato Los vidrios de silicato con los de más uso. La *silice fundida*, formada de SiO₂ puro, tiene un elevado punto de fusión y los cambios dimensionales durante el calentamiento y enfriamiento son pequeños (figura 15-6). En general, sin embargo, los vidrios de silicato contienen óxidos adicionales (tabla 15-5). Aunque los óxidos como la sílice se comportan como **formadores de vidrio**, un óxido **intermedio** (como el óxido de plomo o de aluminio) no forma vidrios por sí mismo pero se incorpora en la estructura de red de los formadores de vidrio. Un tercer grupo de óxidos, los **modificadores**, rompen la estructura de red y finalmente hacen que el vidrio se desvitrifique, es decir, se cristalice.

Vidrios de silicato modificados Los modificadores rompen la red de sílice si la relación oxígeno a silicio (O:Si) aumenta en forma importante. Cuando se agrega Na₂O, por ejemplo, los iones de sodio entran a huecos dentro de la red en lugar de convertirse en parte de la red; no obstante, el ion oxígeno que penetra en el Na₂O sí se convierte en parte de la red (figura 15-7). Cuando esto ocurre, no existen suficientes iones de silicio para combinarse con los iones de oxígeno adicionales y la red cristalina se conserva intacta. En última instancia, una relación elevada de O:Si hace que los tetraedros restantes de sílice formen cadenas, anillos o compuestos, y entonces la sílice ya no se transforma en vidrio. Cuando la relación O:Si es mayor a unos 2.5, es difícil la formación de vidrios de sílice; cuando es superior a tres, se forma el vidrio sólo tomando precauciones especiales, por ejemplo el uso de alta rapidez de enfriamiento.

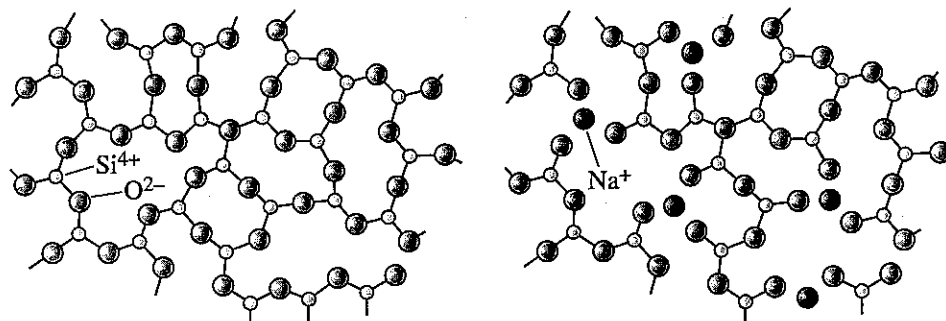
Vidrio de SiO_2 Vidrio de Na_2O modificado

Figura 15-7 Efecto del Na_2O sobre la red del vidrio de sílice. El óxido de sodio es un modificador que altera la red vítrea y reduce la capacidad de formación de vidrios.

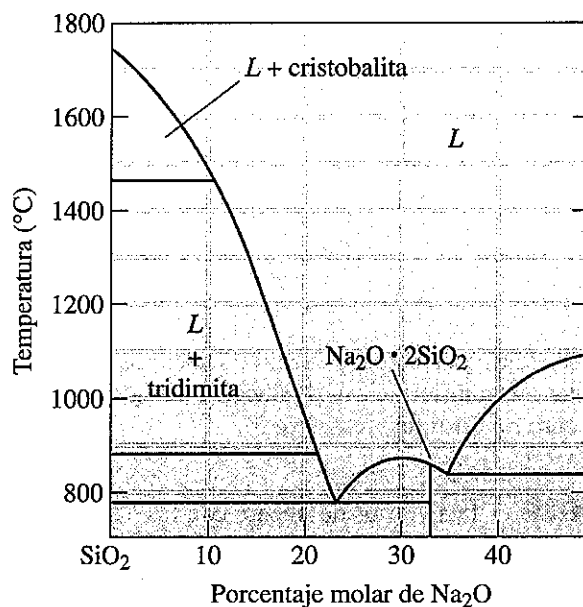
**Figura 15-8**

Diagrama de fases de $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$. Las adiciones de soda (Na_2O) a la sílice reducen considerablemente la temperatura de fusión de la sílice al formar eutécticos.

La modificación también baja el punto de fusión y la viscosidad de la sílice, lo cual hace posible producir vidrio a temperaturas más bajas. Como se puede ver en la figura 15-8, la adición de Na_2O produce eutécticos con muy bajas temperaturas de fusión. Agregar CaO , que reduce la solubilidad del vidrio en agua, modifica todavía más estos vidrios. El ejemplo que sigue muestra la forma de diseñar un vidrio.

Ejemplo 15-2

Diseño de un vidrio

Se produce buena resistencia química en un vidrio cuando se introduce B_2O_3 en sílice. Para asegurar que haya buenas características para formación de vidrio, se desea que la relación $\text{O}:\text{Si}$ sea no mayor a 2.5, pero también se desea que el vidrio tenga una temperatura de fusión baja para hacer que el proceso de formación de vidrio sea más fácil y más económico. Diseñe este vidrio.

SOLUCIÓN

Como el B_2O_3 reduce la temperatura de fusión de la sílice, se desea agregar el máximo posible. Sin embargo, también es necesario asegurar que la relación O:Si no sea superior a 2.5, porque de esta forma se limita la cantidad de B_2O_3 . Como ejemplo, hay que determinar cuánto B_2O_3 debe añadirse para obtener una relación O:Si de exactamente 2.5. Si f_B es la fracción molar de B_2O_3 que se agrega al vidrio y $(1 - f_B)$ es la fracción molar de SiO_2 :

$$\frac{O}{Si} = \frac{\left(3 \frac{\text{iones O}}{B_2O_3}\right)(f_B) + \left(2 \frac{\text{iones O}}{SiO_2}\right)(1 - f_B)}{\left(1 \frac{\text{ion Si}}{SiO_2}\right)(1 - f_B)} = 2.5$$

$$3f_B + 2 - 2f_B = 2.5 - 2.5f_B \text{ o } f_B = 0.143$$

Por tanto, se debe producir un vidrio que no contenga más de 14.3 mol% B_2O_3 . En porcentaje en peso:

$$\% \text{ pe } B_2O_3 = \frac{(f_B)(69.62 \text{ g/mol})}{(f_B)(69.62 \text{ g/mol}) + (1 - f_B)(60.08 \text{ g/mol})} \times 100$$

$$\% \text{ pe } B_2O_3 = \frac{(0.143)(69.62)}{(0.143)(69.62) + (0.857)(60.08)} \times 100 = 16.2$$

Los vidrios se fabrican para producir artículos de gran utilidad, a alta temperatura con viscosidad controlada, a fin de que puedan conformarse sin romperse. La figura 15-9 ayuda a comprender el proceso en función de los grados de viscosidad.

1. *Grado líquido.* Se produce vidrio en placa y en hoja cuando se encuentra en estado líquido, es decir, fundido. Las técnicas incluyen el laminado del vidrio fundido pasándolo a través de rodillos enfriados por agua o flotando el vidrio fundido sobre una tina de estaño fundido (figura 15-10). El proceso de estaño líquido produce en el vidrio una superficie excepcionalmente lisa. El desarrollo del proceso de vidrio flotado fue un genuino adelanto en el procesamiento de los vidrios. La composición básica del vidrio flotado se ha mantenido sin modificaciones esenciales durante muchos años (tabla 15-6 en la página 587).

Algunas formas de vidrio, incluidos grandes espejos ópticos, se producen vaciando el vidrio fundido en un molde y después asegurando un enfriamiento tan lento como sea posible para reducir al mínimo los esfuerzos residuales y evitar que se rompa la pieza. Se pueden producir fibras de vidrio estirando el vidrio líquido a través de pequeñas aberturas hechas en un dado de platino [figura 15-11c)]. Generalmente, con un solo dado se puede producir un gran número de fibras en forma simultánea.

2. *Escala de trabajo.* Las formas como las de los recipientes o focos pueden conformarse por presión, por estirado o soplando el vidrio en moldes (figura 15-11). Se puede preformar un *grumo* de vidrio líquido en una forma burda (*parisón*), y a continuación moldearla o soplarla en un molde caliente para producir la forma final. El vidrio se calienta a una temperatura dentro de una escala de trabajo, de manera que pueda ser maleable pero que no se "corra".

3. *Escala del recocido.* Algunos componentes cerámicos se recuecen para eliminar los esfuerzos residuales durante el conformado. Por ejemplo, se recuecen grandes piezas de vidrio vaciado y se dejan enfriar lentamente para evitar que se agrieten. Algunos vidrios pueden ser tratados térmicamente a fin de causar *devitrificación*, es decir, la precipitación de una fase cristalina a partir del vidrio.

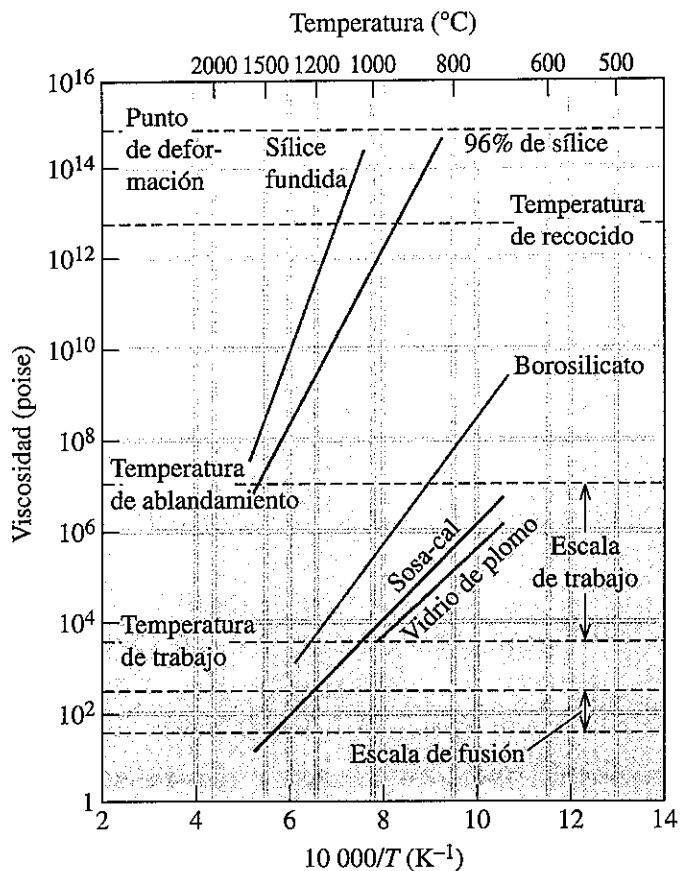


Figura 15-9
Efecto de la temperatura
y de la composición en la
viscosidad del vidrio.

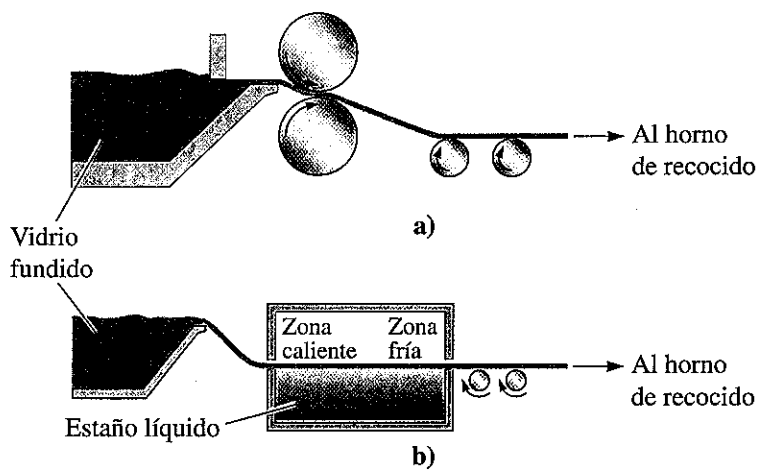


Figura 15-10 Técnicas de manufactura de vidrio en hoja y en placa: a) laminado y b) flotado del vidrio sobre estaño fundido.

TABLA 15-6 ■ Composición de vidrios comunes (en porcentaje en peso)

Vidrio	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	B ₂ O ₃	MgO	PbO	Otros
Sílice fundida	99							
Vycor™	96				4			
Pyrex™	81	2		4	12			
Frascos de vidrio	74	1	5	15		4		
Vidrio para ventanas	72	1	10	14		2		
Placa de vidrio/vidrio flotado	73	1	13	13				
Focos	74	1	5	16		4		
Fibras	54	14	16		10	4		
Termómetros	73	6		10	10			
Vidrio de plomo	67			6			17	10% K ₂ O
Cristal óptico	50			1			19	13% BaO, 8% K ₂ O, ZnO
Corona óptica	70			8		10		2% BaO, 8% K ₂ O
Fibras de vidrio E	55	15	20		10			
Fibras de vidrio S	65	25				10		

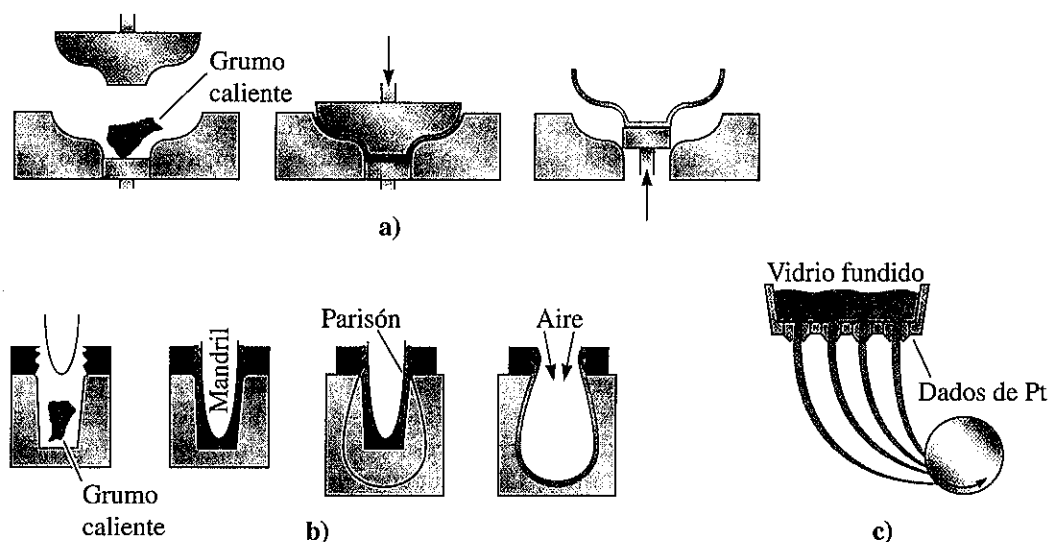
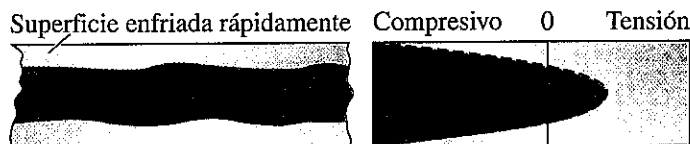


Figura 15-11 Técnicas para formar productos de vidrio: a) a presión, b) proceso de prensado y soplado y c) estirado de fibras.

El **vidrio templado** se produce al templar con aire la superficie de vidrio en placas, causando que las capas superficiales se enfríen y contraigan. Cuando el centro se enfría, su contracción es restringida por la superficie ya rígida, que se pone en compresión (figura 15-12). El vidrio templado es capaz de soportar esfuerzos de tensión mucho más altos y golpes de impactos que el vidrio no templado. El vidrio templado se usa en ventanas de autos y casas, estantes para refrigeradores, hornos, muebles y muchas otras aplicaciones donde la seguridad es importante. El **vidrio laminado**, formado por dos hojas de vidrio recocido con un separador

**Figura 15-12**

El vidrio templado se enfría rápidamente para producir esfuerzos residuales de compresión en la superficie.

de polímero (por ejemplo butiralpolivinilo o PVB), se utiliza para la fabricación de parabrisas de automóvil.

Composiciones de vidrios El SiO_2 puro debe calentarse a temperaturas muy elevadas para lograr viscosidades que permitan un conformado económico. La mayoría de los vidrios comerciales están basados en modificadores de sílice, como la sosa (Na_2O) para disgregar la estructura de red y formar eutécticos de bajas temperaturas de fusión, en tanto que se añade cal (CaO) para reducir la solubilidad del vidrio en el agua. El vidrio comercial más común contiene aproximadamente 75% de SiO_2 , 15% de Na_2O y 10% de CaO y se conoce como vidrio de sosa-cal.

Los vidrios de borosilicato, que contienen cerca de 15% de B_2O_3 , tienen excelente estabilidad química y dimensional. Sus usos incluyen productos de vidrio para laboratorio (PyrexTM), así como recipientes para el desecho de desperdicios nucleares de alto nivel radiactivo. El vidrio de borosilicato de calcio y aluminio, o vidrio E, se utiliza como fibra de uso general para materiales compuestos, por ejemplo la fibra de vidrio. Los vidrios de aluminosilicato, con 20% de Al_2O_3 , y 12% de MgO y los vidrios de alto sílice con 3% de B_2O_3 son excelentes para resistir elevadas temperaturas y como protección contra impactos eléctricos o térmicos. El vidrio S, un aluminosilicato de magnesio, se utiliza para producir fibras de alta resistencia para materiales compuestos. La sílice fundida, o SiO_2 , prácticamente pura, es la que presenta mejor resistencia a altas temperaturas, al impacto térmico y al ataque químico, aunque también resulta costosa.

También se pueden obtener cualidades ópticas especiales, incluyendo sensibilidad a la luz. Los vidrios fotocromáticos, que se oscurecen ante la porción ultravioleta de la luz solar, se utilizan en anteojos. El vidrio fotosensible se oscurece de manera permanente al ser expuesto a la luz ultravioleta; si sólo se exponen porciones seleccionadas del vidrio y después se sumergen en ácido hidrófluorídrico, se pueden producir grabados. Los vidrios policromáticos son sensibles a todo tipo de luz, no sólo a radiaciones ultravioletas. Del mismo modo, en los vidrios de silicato se forman núcleos de cristales minúsculos de semiconductores, como el sulfuro de cadmio (CdS), en un proceso conocido como *striking* (opacidad). Estos vidrios presentan colores brillantes y también tienen propiedades ópticas útiles.

15-6 Vidrios-cerámicos

Los vidrios-cerámicos son materiales cristalinos derivados de los vidrios amorfos. Por lo común, los vidrios-cerámicos tienen un nivel considerable de cristalinidad ($\sim > 70\text{-}99\%$). La formación del vidrio-cerámico fue descubierta por casualidad por Don Stookey. Con los vidrios-cerámicos se puede aprovechar su conformabilidad y su densidad. Se puede obtener un producto con muy baja porosidad produciendo una forma mediante técnicas de conformación convencionales, por ejemplo prensado o soplado.

El primer paso para la producción de un vidrio-cerámico es asegurarse de que no ocurra cristalización durante el enfriamiento a partir de la temperatura de conformado. Para los vidrios basados en silicatos, se puede estudiar un diagrama de transformación de enfriamiento continuo e isotérmico, muy parecido a los diagramas TEC y TTT para los aceros. La figura 15-13a) muestra un diagrama TTT para un vidrio. Si el vidrio se enfría demasiado len-

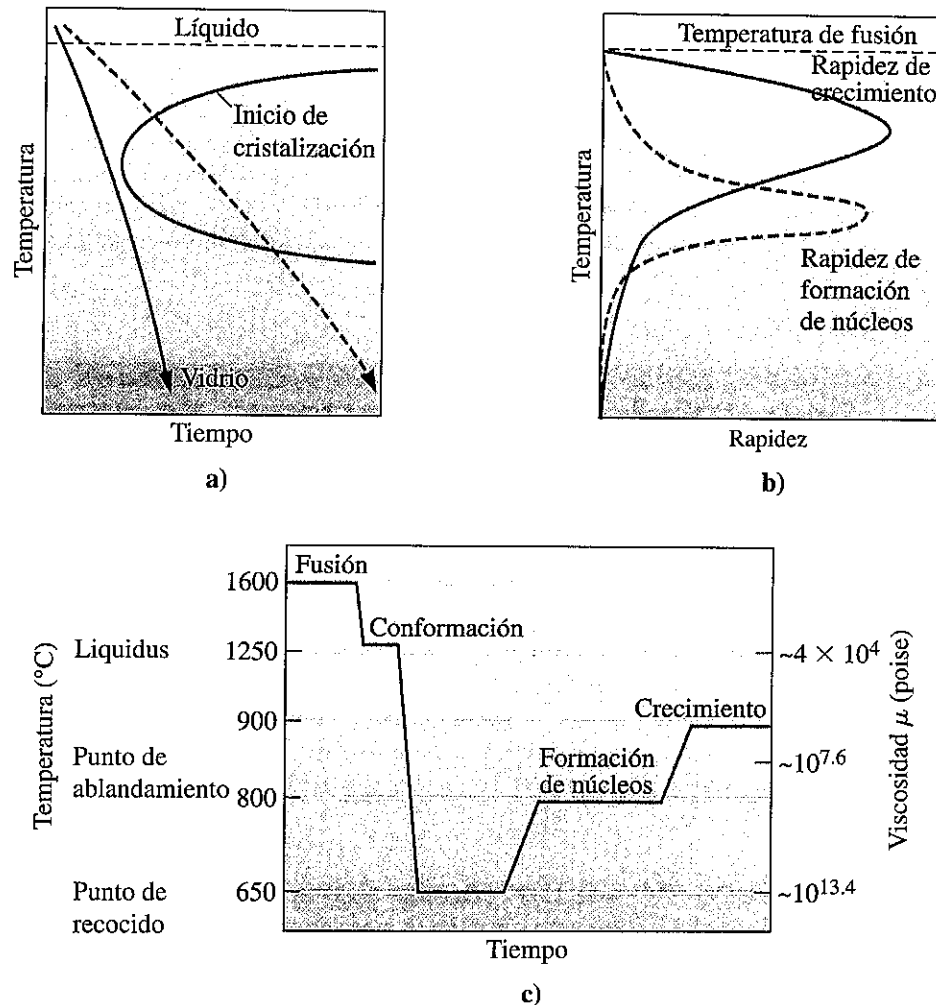


Figura 15-13 Producción de un vidrio-cerámico: a) El enfriamiento debe ser rápido, para evitar el inicio de la cristalización. b) La rapidez de formación de núcleos de precipitados es elevada a bajas temperaturas, mientras que la rapidez de crecimiento de los precipitados es elevada a temperaturas más altas. c) Perfil de tratamiento térmico común para la fabricación de vidrio-cerámico, ilustrado aquí para vidrios $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$.

tamente, se cruzará una línea de transformación; la formación de núcleos y crecimiento de los cristales se iniciará, aunque de forma no controlada. La adición de óxidos modificadores al vidrio, algo muy parecido a agregar elementos de aleación al acero, traslada la curva de transformación hacia tiempos más extendidos y evita la devitrificación, incluso a rapidezces reducidas de enfriamiento. Como se hizo notar en capítulos anteriores, estrictamente hablando, para este análisis se deberían utilizar diagramas TEC (y no TTT).

La formación de núcleos de la fase cristalina se controla de dos maneras. En la primera, el vidrio contiene agentes como el TiO_2 que reaccionan con otros óxidos y forman fases que proporcionan sitios para la formación de núcleos. En la segunda, se diseña un tratamiento térmico para obtener un número apropiado de núcleos; la temperatura debe ser relativamente baja para llevar al máximo la rapidez de formación de núcleos [figura 15-13b)]. Sin embargo, la rapidez general de cristalización depende, en cuanto ocurre la formación de núcleos, de la rapidez de crecimiento de los cristales; se requiere de temperaturas más elevadas para llevar al máximo la rapidez de crecimiento. En consecuencia, se puede utilizar un programa de tratamiento térmico similar al que aparece en la figura 15-13c) para el vidrio-cerámico (PyroceramTM). El paso de baja temperatura aporta los sitios de formación de núcleos, y la

etapa a alta temperatura acelera la rapidez de crecimiento de los cristales; la pieza puede llegar a cristalizarse hasta en 99%.

Esta estructura especial de los vidrios-cerámicos puede dar una buena tenacidad y resistencia mecánica, con frecuencia aunada a un bajo coeficiente de expansión térmica y a una resistencia a la corrosión a altas temperaturas. Quizá el vidrio-cerámico de mayor importancia es el que se basa en el sistema $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$. Estos materiales se utilizan para la fabricación de utensilios de cocina (Corning Ware™) y cubiertas cerámicas para estufas. Otros vidrios-cerámicos se utilizan en comunicaciones, computadoras y aplicaciones ópticas.

15-7 Procesamiento y aplicaciones de productos de arcilla

Los materiales cerámicos cristalinos se usan con frecuencia para la fabricación de artículos de utilidad, preparando una forma o cuerpo compacto compuesto de materias primas en forma de polvo fino. Los polvos se unen a continuación por medio de una reacción química, una **vitrificación** parcial o completa (fusión) o por sinterizado.

Los productos de arcilla forman un grupo de cerámicas tradicionales utilizadas para fabricar tuberías, ladrillos, utensilios de cocina y otros productos de uso común. La arcilla, igual que la caolinita, y el agua sirven como aglutinante inicial para los polvos cerámicos, que comúnmente son de sílice. Durante los tratamientos térmicos posteriores, se utilizan otros materiales como agentes fundentes (formadores de vidrio), por ejemplo el feldespato $[(\text{K}, \text{Na})_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2]$.

Técnicas de conformado para productos de arcilla Los polvos, la arcilla, el fundente y el agua se mezclan y se les da forma. Las mezclas secas o semi-secas se comprimen mecánicamente formando piezas “verdes” (sin hornear) con suficiente resistencia para poder manejarlas. Para una compactación más uniforme de piezas complejas, se puede utilizar un prensado isostático; los polvos se colocan en un molde de hule y se someten a elevadas temperaturas en un medio gaseoso o líquido. Contenidos más elevados de humedad hacen que los polvos sean más plásticos o conformables. Los procesos de **conformado hidrolástico**, como la extrusión, el moldeo por tarraja (dar forma a una arcilla en un molde giratorio usando una herramienta de perfiles para formar la superficie interior), y el formado a mano, pueden aplicarse a estas mezclas plásticas. Las lechadas cerámicas pueden inyectarse en moldes cuando contienen grandes cantidades de plastificantes orgánicos en sustitución del agua.

Un contenido aún más alto de humedad permite la formación de barbotina, es decir, de una lechada que se puede vaciar y que contiene polvo cerámico fino. Esta barbotina se vacía en un molde poroso. El agua presente en la barbotina más cercana a la pared del molde es atraída hacia éste, dejando atrás un sólido blando con un contenido bajo en humedad. Cuando se ha extraído suficiente agua de la barbotina para producir el espesor deseado de un sólido, el resto se vacía y queda en el molde una cáscara hueca. El vaciado o moldeo por escurrimiento se utiliza en la manufactura de lavamanos y otros productos comerciales. Después del formado, las piezas cerámicas, o cerámica verde, todavía no tienen resistencia, contienen agua y otros lubricantes y son porosas, por lo que se requiere un secado y quemado subsiguientes.

Secado y quemado de productos de arcilla Durante el secado, se elimina el exceso de humedad y ocurren grandes cambios dimensionales. Inicialmente, el agua existente entre las plaquetas de arcilla, es decir, el agua entre partículas, se evapora y produce la mayor parte de la contracción. Después ocurrirá un cambio dimensional relativamente pequeño cuando se evapore el agua restante entre los poros. Para obtener un secado

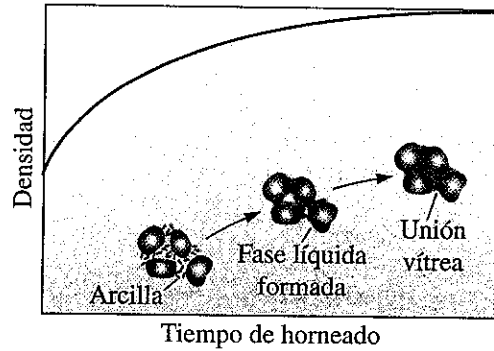


Figura 15-14

Durante el quemado, la arcilla y otros materiales fundentes reaccionan con las partículas más gruesas para producir una unión vítrea y para reducir la porosidad.

uniforme en toda la pieza y minimizar de esta manera los esfuerzos, la distorsión y las grietas, se controlan cuidadosamente tanto la temperatura como la humedad.

La rigidez y la resistencia de una pieza cerámica se obtienen durante su **horneado** o **quemado**. Durante el calentamiento, la arcilla se deshidrata, eliminando el agua que forma parte de la estructura cristalina de la caolinita y la vitrificación o la fusión, se inicia (figura 15-14). Las impurezas y el fundente reaccionan con las partículas cerámicas (SiO_2) y la arcilla, produciendo una fase líquida de bajo punto de fusión en la superficie de los granos. El líquido ayuda a eliminar la porosidad y, después del enfriamiento, se convierte en un vidrio rígido que une las partículas cerámicas. Esta fase vítrea proporciona una **unión cerámica**, pero también causa una contracción adicional en todo el cuerpo cerámico.

El tamaño del grano de la pieza final lo determina principalmente el tamaño de las partículas originales. Además, conforme se incrementa el **fundente**, se reduce la temperatura de fusión, se forma más vidrio y los poros se hacen más redondos y pequeños. Un menor tamaño inicial de grano acelera este proceso al aportar más área superficial donde pueda ocurrir la vitrificación.

Aplicaciones de productos de arcilla Muchos productos de arcilla estructurales y loza blanca se fabrican en estos procesos. Los ladrillos y las losas utilizadas en la construcción se prensan o extruyen para darles forma, se secan y se queman para producir la unión cerámica. Las temperaturas de horneado más elevadas o los tamaños más finos de partículas originales producen una mayor vitrificación, menos porosidad y mayor densidad. La mayor densidad mejora las propiedades mecánicas, pero reduce las cualidades aislantes de los ladrillos o de las losas.

Los productos de barro son formas de arcilla porosa horneadas a temperaturas relativamente bajas. Se presenta poca vitrificación, la porosidad es muy elevada e interconectada y los materiales cerámicos de barro pueden tener filtraciones. En consecuencia, estos productos deben estar recubiertos con un vidriado impermeable.

A temperaturas más altas de horneado, que proporcionan mayor vitrificación y menor porosidad, se produce el gres. El gres, que se utiliza para tuberías de drenaje y de aguas negras, contiene sólo de 2 a 4% de porosidad. Los productos cerámicos conocidos como porcelana requieren temperaturas de horneado aún más elevadas para obtener una vitrificación completa sin porosidad alguna.

15-8 Refractarios

Los materiales refractarios son componentes importantes en el equipo que se utiliza para la producción, refinación y manejo de metales y de vidrios, para la construcción de hornos de tratamiento térmico y otros equipos de procesos a altas temperaturas. Los **refractarios** deben soportar altas temperaturas sin sufrir corrosión o debilitamiento por el entorno circundante. Los

TABLA 15-7 Composiciones de refractarios comunes (porcentaje en peso)

Refractario	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃
Ácido					
Sílice	95-97				
Ladrillo refractario de alta resistencia	51-53	43-44			
Ladrillo refractario de alta alúmina	10-45	50-80			
Básico					
Magnesita			83-93	2-7	
Olivina	43		57		
Neutro					
Cromita	3-13	12-30	10-20	12-25	30-50
Cromita-magnesita	2-8	20-24	30-39	9-12	30-50

De Ceramic Data Book, Cahners Publishing Co., 1982.

refractarios comunes están compuestos de partículas gruesas de óxido unidas por un material refractario más fino. Este último se funde durante el horneado proporcionando la unión. En algunos casos, los ladrillos refractarios tienen una porosidad aparente de entre 20 y 25% con objeto de obtener un mejor aislamiento térmico.

Los refractarios suelen clasificarse en tres grupos: ácido, básico y neutro, en función a su comportamiento químico (tabla 15-7).

Refractarios ácidos Los refractarios ácidos comunes contienen sílice, alúmina y arcilla refractaria (una caolinita impura). A veces se utiliza la sílice pura para contener metales fundidos. En algunas aplicaciones, la sílice puede ser aglutinada con pequeñas cantidades de óxido de boro, que se funde y produce la unión cerámica. Si se le agrega una pequeña cantidad de alúmina a la sílice, el refractario contiene un microconstituyente eutéctico de bajo punto de fusión (figura 15-15) y no resulta adecuado para aplicaciones refractarias a temperaturas por arriba de aproximadamente 1600 °C, temperatura que con frecuencia es necesaria para la fabricación de aceros. Sin embargo, cuando se le agregan cantidades más grandes de alúmina, la microestructura contiene cantidades crecientes de mulita, $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ que tiene una elevada temperatura de fusión. En general, estos refractarios de barro son relativamente débiles, aunque poco costosos. Las concentraciones de alúmina superiores a cerca de 50% forman los refractarios de alta alúmina.

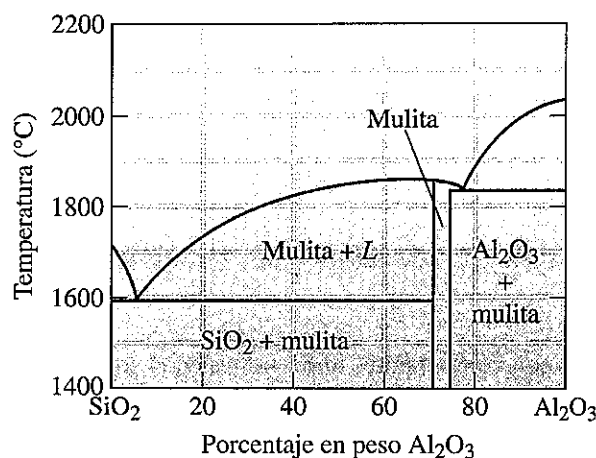


Figura 15-15
Diagrama de fases simplificado de $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, base para los refractarios de silicatos de alúmina.

Refractarios básicos Varios refractarios están basados en MgO (magnesia o periclasa). El MgO puro tiene un elevado punto de fusión, buena capacidad refractaria y buena resistencia al ataque de los entornos básicos que suelen encontrarse en los procesos de fabricación de aceros. Los refractarios de olivina contienen forsterita, es decir Mg_2SiO_4 , y también tienen altos puntos de fusión. Otros refractarios de magnesia pueden incluir CaO o carbono. Comúnmente, los refractarios básicos son más costosos que los ácidos.

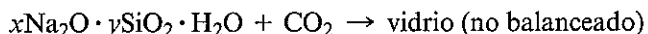
Refractarios neutros Estos refractarios, que incluyen la cromita y la cromita-magnesita, pueden utilizarse para separar refractarios básicos de los ácidos y evitar que se ataquen entre sí.

Refractarios especiales En muchas aplicaciones refractarias se utiliza el carbono o grafito, en particular cuando no está presente el oxígeno. Otros materiales refractarios son la zirconia (ZrO_2), el zircón ($\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$), así como una diversidad de nitruros, carburos y boruros. La mayoría de los carburos, como el TiC y el ZrC, no resisten bien la oxidación y sus aplicaciones a altas temperaturas son más adecuadas para condiciones de reducción. Sin embargo, el carburo de silicio es una excepción; cuando se oxida el SiC a altas temperaturas, se forma en su superficie una delgada capa de SiO_2 que protege al SiC contra oxidación adicional hasta aproximadamente 1500 °C. Los nitruros y los boruros también tienen elevadas temperaturas de fusión y son menos susceptibles a la oxidación. Algunos de los óxidos y de los nitruros son candidatos para su uso en motores a reacción.

15-9 Otros materiales cerámicos

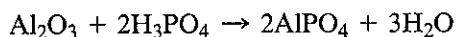
Además de su uso en la producción de materiales para la construcción, de aparatos domésticos, materiales estructurales y refractarios, los productos cerámicos encuentran una infinidad de aplicaciones, incluyendo las siguientes.

Cementos Las materias primas cerámicas se unen mediante un aglutinante sin necesidad de quemado o sinterizado, en un proceso conocido como **cementación**. Una reacción química convierte una resina líquida en un sólido que une las partículas. En el caso del silicato de sodio, la introducción del gas CO_2 actúa como catalizador para deshidratar la solución de silicato de sodio, formando un material vítreo:



La figura 15-16 de la página siguiente muestra los granos de arena sílice utilizados en la fundición de metales para producir moldes. El silicato de sodio líquido recubre los granos de arena proporcionando puentes entre los mismos. La introducción de CO_2 convierte los puentes en un sólido, uniéndolos a los granos de arena.

Las soluciones de polvo fino de alúmina catalizadas con ácido fosfórico producen un cemento de fosfato de aluminio:



Cuando se unen partículas de alúmina con el cemento de fosfato de aluminio, se producen refractarios capaces de operar a temperaturas de hasta 1650 °C.

El yeso es otro material que se endurece mediante una reacción de cementación:

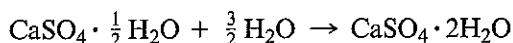




Figura 15-16

Micrografía de granos de arena sílice unidos con silicato de sodio a través del mecanismo de cementación (60×).

(Reimpreso por cortesía de Don Askeland.)

Cuando reacciona la lechada líquida, crecen cristales sólidos de entrelazamiento de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) con poros muy pequeños entre los cristales. Una mayor cantidad de agua en la lechada original proporciona más porosidad, aunque también reduce la resistencia final del yeso. Uno de los usos más importantes de este material es para la construcción de paredes en los edificios.

Las reacciones de cementación más comunes y de mayor importancia se presentan en el cemento Portland, que se utiliza para producir el concreto. (Véase el capítulo 18.)

Recubrimientos Los productos cerámicos suelen utilizarse en recubrimientos protectores para otros materiales. Los vidriados y los esmaltados son recubrimientos comerciales de uso común. Los vidriados se aplican en las superficies de materiales cerámicos para sellar el cuerpo permeable de arcilla, para proteger y decorar o para fines especiales. Los esmaltes se aplican sobre superficies metálicas. Los esmaltes y los vidriados son productos de arcilla que se vitrifican fácilmente durante el horneado. Una composición común es $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$.

Mediante la adición de otros minerales se pueden producir colores especiales en los vidriados y en los esmaltes. Con el silicato de zirconio se obtiene un vidriado blanco; con el óxido de cobalto, un vidriado azul; con el óxido de cromo, uno verde; con el óxido de plomo, el color es amarillo; el vidriado rojo se logra agregando una mezcla de sulfuros de cadmio y de selenio.

Uno de los problemas que presentan los vidriados o los esmaltes es el agrietamiento o las cuarteaduras en la superficie, que ocurren cuando el vidriado tiene un coeficiente de expansión térmica diferente al del material subyacente. Con frecuencia, éste es el factor más importante para determinar la composición del recubrimiento.

Para materiales cerámicos avanzados y metales de operación a altas temperaturas, se utilizan recubrimientos especiales. A los materiales compuestos carbono-carbono se les aplican recubrimientos de SiC , a fin de mejorar su resistencia a la oxidación. A las superaleaciones basadas en níquel se les aplican recubrimientos de zirconia como barreras térmicas para proteger el metal contra la fusión o contra reacciones adversas.

Películas delgadas y cristales individuales Se pueden producir películas delgadas en muchos materiales cerámicos complejos y multicomponentes utilizando diferentes técnicas; por ejemplo, deposición electrónica, sol-gel y deposición química de vapor (DQV). Normalmente, el espesor de estas películas es de 0.05 a 10 μm , y más probablemente superior a 2 μm . Muchas películas delgadas de cerámicos electrónicos funcionales se preparan e integran en obleas de silicio, en vidrios y en otros sustratos. Por ejemplo, las tiras magnéticas existentes en las tarjetas de crédito utilizan películas delgadas de óxido de hierro ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ o Fe_3O_4) para el almacenamiento de datos. El óxido de estaño indio (ITO, indium tin oxide), un material transparente y conductor, se aplica sobre el vidrio y se utiliza en aplicaciones tales como desplegados de pantalla táctil (tabla 15-1). Se utilizan muchos otros recubrimientos sobre los vidrios con objeto de hacerlos eficientes en la transmisión de energía. Recientemente se inventó un vidrio que se limpia a sí mismo utilizando un recubrimiento de

TiO₂. Del mismo modo, se pueden preparar y utilizar películas delgadas de materiales cerámicos, como las soluciones sólidas de titanato de zirconio de plomo (PZT), PZT dopado con lantano (PLZT), y BaTiO₃-SrTiO₃. A veces, las películas presentan una orientación o textura que puede resultar ventajosa para una aplicación determinada. En muchas aplicaciones eléctricas y electroópticas se utilizan cristales individuales de numerosos materiales cerámicos [por ejemplo, SiO₂ o cuarzo, niobato de litio (LiNbO₃), zafiro, es decir, almandinato de itrio aluminio]. Estos cristales se hacen crecer partiendo de fusiones utilizando técnicas similares a las descritas en el capítulo 9.

Fibras Las fibras se producen a partir de materiales cerámicos para diversos usos: como refuerzo en materiales compuestos, para ser tejidas o para usarse en sistemas de fibras ópticas. Las fibras de vidrio de borosilicato, que son las más comunes, proporcionan resistencia y rigidez en la fibra de vidrio. Las fibras pueden producirse partiendo de una diversidad de otros materiales cerámicos, incluyendo la alúmina, el carburo de silicio, la sílice y el carburo de boro. También se puede utilizar el proceso sol-gel para producir fibras comerciales para muchas aplicaciones.

Un material fibroso de tipo especial es la loseta de sílice que se utiliza para formar el sistema de protección térmica del transbordador espacial de la NASA. Para producir una loseta excepcionalmente ligera con densidades de sólo 0.144 g/cm³, se aglutinan fibras de sílice con sílice coloidal; la loseta se recubre con vidriados especiales de alta capacidad de emisión, a fin de obtener una protección de hasta 1300 °C.

Unión y ensamble de piezas cerámicas Con frecuencia, los productos cerámicos se fabrican como componentes monolíticos en lugar de muchas piezas ensambladas. Cuando se ponen en contacto dos piezas cerámicas bajo carga, se crean concentraciones de esfuerzo en la frágil superficie, lo que provoca una mayor probabilidad de falla. Además, son pocos y limitados los métodos para la unión de piezas cerámicas en un ensamble mayor. Los materiales cerámicos frágiles no pueden ser unidos mediante procesos de soldadura de fusión o unión por deformación. A bajas temperaturas, se pueden lograr uniones adhesivas utilizando materiales poliméricos; a temperaturas más elevadas, se pueden utilizar cementos cerámicos. Para unir materiales cerámicos entre sí o para unir materiales cerámicos a metales, se puede utilizar la unión por difusión o la soldadura fuerte.

Resumen

- Los cerámicos son materiales inorgánicos con una elevada dureza y un alto punto de fusión; incluyen los materiales cerámicos monocristalinos y los policristalinos, así como los vidrios-cerámicos. Entre los materiales cerámicos comunes se encuentran los aislantes eléctricos y térmicos de buena estabilidad química y satisfactoria resistencia a la compresión.
- Los materiales cerámicos policristalinos tienen un comportamiento frágil, debido en parte a su porosidad. En vista de que la mayoría de los materiales cerámicos policristalinos no son deformables plásticamente (a menos que se satisfagan condiciones especiales respecto a la temperatura y a la rapidez de deformación), la porosidad limita la capacidad del material para soportar una carga de tensión.
- Los materiales cerámicos desempeñan una función determinante en una amplia gama de tecnologías relacionadas con la electrónica, el magnetismo, la óptica y la energía. Muchos materiales cerámicos avanzados tienen un muy importante papel al dar aislamiento térmico y propiedades a altas temperaturas. Las aplicaciones de los materiales cerámicos comprenden desde tarjetas de crédito, cápsulas para chips de silicio, losetas para el transbordador espacial, para imágenes médicas, fibras ópticas que permiten las comunicaciones y vidrios con energía y seguridad eficientes. Los materiales cerámicos tradicionales funcionan como refractarios para el procesamiento de metales y en aplicaciones de consumo.

- El procesamiento de los materiales cerámicos por lo común se lleva a cabo utilizando compactación y sinterizado. En aplicaciones especializadas, se utiliza la compactación isostática, el prensado en caliente y el prensado isostático en caliente (PIC) especialmente para obtener niveles más elevados de densificación.
- La técnica de fundición en cinta, el moldeo o vaciado por escurrimiento, la extrusión y el moldeo por inyección son algunas otras técnicas que se utilizan para darles diferentes formas a los materiales cerámicos verdes. Estos procesos son seguidos por una etapa de quemado u horneado, en la que se queman los aglutinantes y los plastificantes y se sinteriza el material cerámico resultante.
- Muchos silicatos y otros materiales cerámicos forman vidrios con una razonable facilidad, dado que la cinética de la cristalización es lenta. Se pueden formar vidrios en hojas utilizando vidrio flotado, fibras u otras formas. Se utilizan vidrios de silicato en un importante número de aplicaciones que incluyen vidrios para ventanas, parabrisas, fibras ópticas y fibras de vidrio.
- A los vidrios-cerámicos se les da forma mediante la cristalización controlada de los vidrios inorgánicos. Estos materiales se usan ampliamente en utensilios de cocina y muchas otras aplicaciones.
- Los materiales cerámicos en forma de fibras, películas delgadas, recubrimientos o como cristales individuales tienen numerosas aplicaciones diferentes.

Glosario

Barbotina Suspensión líquida que se vacía en un molde. Cuando la lechada empieza a endurecerse en las superficies del molde, se vierte la suspensión líquida remanente y queda sólo una pieza cerámica hueca.

Cementación Unión de materias primas cerámicas mediante aglutinantes que forman un vidrio o gel sin horneado a altas temperaturas.

Cerámica Material inorgánico con alta temperatura de fusión. Por lo general es duro y frágil.

Cerámica verde Cerámica a la que se le ha dado la forma deseada pero que todavía no ha sido sinterizada.

Cermet Compuesto cerámico metálico (por ejemplo WC-Co) que logra una buena combinación de dureza con otras propiedades por ejemplo la tenacidad.

Conformado hidropultrástico Varios procesos mediante los cuales se moldea un cuerpo cerámico de arcilla húmeda y se le da una forma útil.

Densidad volumétrica Masa del cuerpo cerámico por unidad de volumen, incluyendo tanto la porosidad cerrada como la interconectada.

Devitrificación Cristalización del vidrio.

Enlace por reacción Técnica de procesamiento cerámico por medio de la cual se hace una forma usando un material que, posteriormente, se convierte en un material cerámico por reacción con un gas.

Esmalte Recubrimiento cerámico sobre metal.

Formadores de vidrio Óxidos con una elevada capacidad de aglutinamiento que produce con facilidad un vidrio durante su procesamiento.

Fundente Adiciones a materias primas cerámicas que promueven la vitrificación.

Fundición en cinta Proceso para la elaboración de hojas delgadas de material cerámico mediante una lechada cerámica que consiste en aglutinantes, plastificantes, etc. Este barro se vacía con la ayuda de una cuchilla en un sustrato plástico. La cinta verde resultante se seca, se corta y maquina a continuación para su uso en dispositivos cerámicos electrónicos y otros.

Horneado o quemado Calentamiento de un cuerpo cerámico a una temperatura elevada para que se origine la formación de una unión cerámica.

Intermedios Óxidos que, al ser agregados a un vidrio, ayudan a extender la red vítrea; estos óxidos normalmente no forman por sí mismos un vidrio.

Metalurgia de polvos Rutas de procesamiento de polvos utilizados para convertir polvos metálicos y de aleaciones en formas útiles.

Moldeo por escurrimiento Conformado de una pieza cerámica hueca mediante la introducción de una lechada que se puede vaciar en un molde. El agua de la lechada se extrae hacia el molde poroso y se deja una superficie más seca. La lechada excedente se puede decantar entonces.

Moldeo por inyección Técnica de procesamiento en la cual una masa termoplástica, cargada de polvos cerámicos, se mezcla en un dispositivo de tipo extrusión y después se inyecta en un molde para formar un componente complejo. En los materiales cerámicos, el material termoplástico se quema. Este procedimiento también se utiliza ampliamente para la conformación de materiales termoplásticos (capítulo 16).

Parisón Forma vítrea burda que sirve como paso intermedio en la producción de cristalería de vidrio. Posteriormente, se da forma al parisón para obtener un producto terminado.

Polvo Conjunto de partículas finas.

Porosidad aparente Porcentaje de porosidad interconectada en un cuerpo cerámico.

Porosidad verdadera Porcentaje de un cuerpo cerámico compuesto tanto por porosidad cerrada como por porosidad interconectada.

Prensado en caliente Técnica de procesamiento de materiales cerámicos en la que el sinterizado se efectúa bajo presión uniaxial.

Prensado isostático en caliente [PIC] Técnica de procesamiento de polvos con la que se pueden producir grandes piezas de metales, aleaciones y cerámicos, utilizando el sinterizado bajo una presión hidrostática generada por un gas.

Prensado isostático en frío [PIF] Técnica de conformación de polvos en la cual, durante la compactación, se aplica presión hidrostática. Se utiliza para lograr una densidad más elevada de la cerámica verde o mejor compactación de formas más complejas.

Procesamiento de polvos Operaciones unitarias que se llevan a cabo para convertir polvos en formas útiles (por ejemplo, prensado, fundición en cinta, etcétera).

Refractarios Grupo de materiales cerámicos capaces de soportar elevadas temperaturas durante periodos prolongados.

Secado por aspersión Se rocía una lechada de polvos cerámicos en una cámara espaciosa en presencia de aire caliente. Esto lleva a la formación de aglomerados blandos que pueden fluir con facilidad en los moldes utilizados durante la compactación de polvos.

Sinterización Proceso en el que un material es calentado a una elevada temperatura para aumentar su densidad.

Síntesis Etapas conducentes a la elaboración de un polvo cerámico.

Temperatura de transición vítrea Temperatura por debajo de la cual un líquido subenfriado se convierte en vidrio. Ésta no es una temperatura fija.

Unión cerámica Aglutinamiento de materiales cerámicos que permite la formación de un producto vítreo a elevadas temperaturas de horneado.

Vidriado Recubrimiento cerámico aplicado al vidrio. El vidriado contiene fases cerámicas vítreas y cristalinas.

Vidrio Material amorfo que se obtiene al enfriar un material cerámico fundido.

Vidrio laminado Vidrio recocido con un polímero (por ejemplo butiralpolivinilo, PVB) emparedado entre dos vidrios, que se utiliza en parabrisas de automóviles.

Vidrio templado Vidrio de alta resistencia que tiene una capa superficial donde el esfuerzo es de compresión, mismo que ha sido inducido térmicamente durante el enfriamiento o mediante la difusión química de iones.

Vidrios-cerámicos Formas de cerámica en estado vidrioso y que posteriormente se dejan cristalizar durante un tratamiento térmico, para lograr mejor resistencia y tenacidad.

Vitrificación Formación de un vidrio. Devitrificar significa cristalizar un vidrio.

Problemas

Sección 15-1 Aplicaciones de materiales cerámicos

15-1 ¿Cuáles son los tipos principales de enlaces atómicos en materiales cerámicos?

15-2 Explique el significado de los siguientes términos: material cerámico, vidrios inorgánicos y vidrios-cerámicos.

15-3 Explique la razón por la cual comúnmente los materiales cerámicos se procesan en forma de polvos. ¿En qué difiere o en que se asemeja lo anterior al procesamiento de los metales?

15-4 ¿Qué significan los términos “vidriado” y “esmalte”?

- 15-5** ¿Qué material se utiliza para la fabricación de las losetas que dan protección térmica al transbordador espacial de la NASA?
- 15-6** ¿Cuáles son los materiales cerámicos de más uso?
- 15-7** Explique las diferentes formas en que pueden clasificarse los materiales cerámicos.
- 15-8** Explique cualquier aplicación para los materiales cerámicos siguientes: a) alúmina, b) sílice, c) titanato de bario, d) zirconia, e) carburo de boro y f) diamante.

Sección 15-2 Propiedades de materiales cerámicos

- 15-9** ¿Cuáles son algunas de las características comunes de los materiales cerámicos?
- 15-10** ¿Por qué la resistencia a la tensión de los materiales cerámicos es mucho menor que la resistencia a la compresión?
- 15-11** En los metales es importante la deformación plástica debida a los movimientos de dislocaciones; sin embargo, esto no es una consideración de importancia para las propiedades de los materiales cerámicos y de los vidrios. Explique.
- 15-12** ¿Pueden los materiales cerámicos mostrar un comportamiento superplástico, o en todos los casos son materiales frágiles? Explique.
- 15-13** Explique por qué los materiales cerámicos tienden a mostrar amplia dispersión en sus propiedades mecánicas.

Sección 15-3 Síntesis y procesamiento de los polvos cerámicos

- 15-14** ¿Cuál es la ventaja del sinterizado?
- 15-15** ¿Cuál es la ventaja del crecimiento de granos?
- 15-16** ¿Cuáles son los mecanismos de difusión que desempeñan el papel de mayor importancia en el sinterizado en estado sólido de materiales cerámicos?
- 15-17** Explique el uso de los siguientes procesos (utilice un esquema cuando sea necesario): a) compactación y sinterizado uniaxial, b) prensado en caliente, c) prensado isostático en caliente (PIC) y d) fundición en cinta.

Sección 15-4 Características de los materiales cerámicos sinterizados

- 15-18** ¿Cuáles son algunas de las características de importancia de los materiales cerámicos sinterizados?
- 15-19** ¿Qué niveles comunes de densidad se obtienen en los materiales cerámicos sinterizados?

- 15-20** ¿Cuál es el significado de los términos “porosidad aparente” y “porosidad verdadera”?

- 15-21** La gravedad específica del Al_2O_3 es 3.96 g/cm^3 . Mediante el sinterizado del polvo de alúmina se produce una pieza cerámica. Cuando está seca, pesa 80 g; después de sumergirla en agua, 92 g, y 58 g cuando está suspendida en agua. Calcule la porosidad aparente, la porosidad verdadera y la porosidad cerrada.

- 15-22** El carburo de silicio (SiC) tiene una gravedad específica de 3.1 g/cm^3 . Se produce una pieza de SiC sinterizada, que ocupa un volumen de 500 cm^3 y que pesa 1200 g. Después de sumergirse en agua, la pieza pesa 1250 g. Calcule la densidad volumétrica, la porosidad verdadera y la fracción volumétrica de la porosidad total formada por poros cerrados.

- 15-23** Un material cerámico de óxido sinterizado de zirconia (ZrO_2) tiene una porosidad verdadera de 28%, y la fracción cerrada de poros es de 0.5. Si el peso después de sumergirla en agua es de 760 g, ¿cuál es el peso en seco del material cerámico? La gravedad específica del ZrO_2 es de 5.68 g/cm^3 .

Sección 15-5 Vidrios inorgánicos

- 15-24** ¿Cuál es la razón principal por la que el vidrio se forma fácilmente en sistemas de silicatos?

- 15-25** ¿Pueden formarse vidrios utilizando materiales metálicos?

- 15-26** Defina los términos “formadores de vidrio”, “intermedios” y “modificadores”.

- 15-27** ¿Qué significa el término “temperatura de transición vítrea”? ¿Es fija esta temperatura para una composición determinada de vidrio?

- 15-28** ¿Cuántos gramos de BaO se pueden agregar a 1 kg de SiO_2 antes de que la relación O:Si exceda 2.5 y las tendencias de formación de vidrio sean malas? Compare lo anterior con el caso en que se le agrega Li_2O al SiO_2 .

- 15-29** Calcule la relación O:Si cuando se agregan al SiO_2 30% en peso de Y_2O_3 . ¿Este material tendrá buenas tendencias de formación de vidrio?

- 15-30** Un silicato de vidrio tiene 10 mol% de Na_2O y 5 mol% de CaO . Calcule la relación O:Si y la composición en %pe para este vidrio.

- 15-31** Un vidrio de borosilicato (82% de SiO_2 , 2% de Al_2O_3 , 4% de Na_2O , 12% de B_2O_3) tiene

una densidad de 2.23 g/cm^3 , en tanto que el vidrio de sílice fundida (suponga 100% de SiO_2) tiene una densidad de 2.2 g/cm^3 . Explique por qué la densidad del vidrio de borosilicato es diferente del promedio ponderado de las densidades de sus componentes. Las densidades del Al_2O_3 , Na_2O y B_2O_3 son 3.98 g/cm^3 , 2.27 g/cm^3 y 2.5 g/cm^3 , respectivamente.

15-32 Clasifique los vidrios siguientes por temperatura de ablandamiento (del más alto al más bajo):

- PyrexTM (81% de SiO_2 , 2% de Al_2O_3 , 4% de Na_2O , 12% de B_2O_3);
- Vidrio de cal (72% de SiO_2 , 1% de Al_2O_3 , 10% de CaO , 14% de Na_2O), y
- VycorTM (96% de SiO_2 , 4% de B_2O_3).

Sección 15-6 Vidrios-cerámicos

15-33 ¿En qué difiere un vidrio-cerámico de un vidrio y de un material cerámico?

15-34 ¿Cuáles son las ventajas del uso de vidrios-cerámicos en comparación ya sea con vidrios o materiales cerámicos?

15-35 Haga un bosquejo de un perfil común de tratamiento térmico que se utiliza en el procesamiento de vidrios-cerámicos.

15-36 ¿Cuáles son algunas de las aplicaciones más importantes de los vidrios-cerámicos?



Problemas de diseño

15-37 Diseñe un vidrio de sílice de sosa-cal que se pueda fundir y vaciar a 1300°C y que tenga una relación O:Si menor a 2.3 para asegurar buena tendencia a la formación de vidrios. Para asegurar una viscosidad adecuada, la temperatura de vaciado debe estar por lo menos 100°C arriba de la temperatura de liquidus.



Problemas de cómputo

15-38 *Perfil de sinterizado.* Escriba un programa de cómputo que pida al usuario las temperaturas durante las diferentes etapas del sinterizado. El programa debe pedir temperaturas iniciales, temperaturas para el quemado del aglutinante, temperaturas durante el sinterizado y temperaturas finales. El usuario también deberá proporcionar el tiempo de sinterizado. El programa debe pedir al usuario la rapidez de calentamiento para el quemado del aglutinante y la etapa entre quemado del aglutinante y sinterizado, así como la rapidez de enfriamiento. El programa entonces deberá mostrar las temperaturas para cualquier tiempo dado y declarar la etapa del ciclo de sinterizado en el horno.

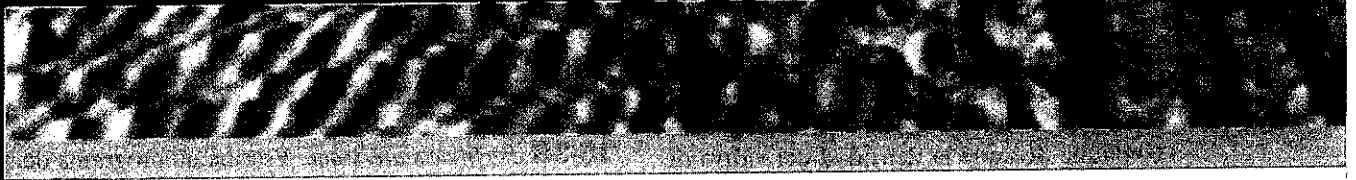
15-39 *Densidad aparente y volumétrica.* Escriba un programa que pida al usuario la información necesaria del cálculo de la densidad aparente y en volumen de piezas cerámicas. El programa también deberá calcular la porosidad interconectada y la porosidad cerrada.

Knovel® Problemas

K15-1 ¿Cuáles son tamaños comunes de grano y parámetros de sinterización para nanocerámicas?

K15-2 ¿Cuáles son las ventajas de los recubrimientos sol-gel sobre otros recubrimientos de materiales cerámicos?

K15-3 ¿Cuáles son valores comunes para el porcentaje de expansión térmica lineal de refractarios? Usando gráficas interactivas, determine cuáles refractarios experimentan mayor expansión térmica lineal a 1200°C : zirconia o alúmina?

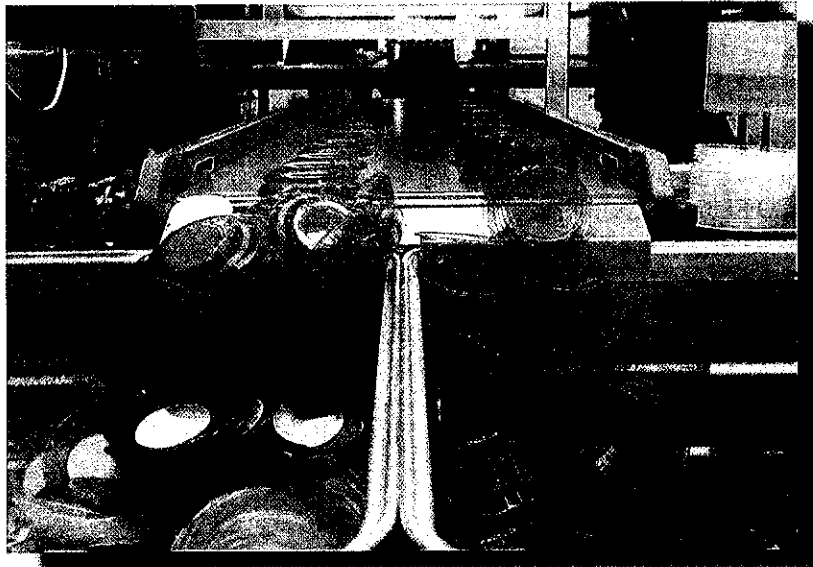


© Xsphoto | Dreamstime.com



Resinas de polímeros de diferentes colores que se inyectan en moldes.

© Alterfalter | Dreamstime.com



Producción masiva de contenedores hechos de plástico y provenientes de las resinas de polímero.

Polímeros

¿Se ha preguntado alguna vez?

- ¿De qué están hechos los discos compactos (CD)?
- ¿De qué está hecho el Silly Putty®?
- ¿Qué polímero se usa en la goma de mascar?
- ¿Cuál fue la primera fibra sintética en fabricarse?
- ¿Por qué algunos plásticos son "a prueba de lavavajillas" y otros no?
- ¿De qué están fabricados los chalecos a prueba de balas?
- ¿Qué polímero se usa para utensilios de cocina antiadherentes?

En este capítulo, examinará la estructura, propiedades y procesamiento de polímeros. El sufijo *mero* significa "unidad". En este contexto, el término *polímero* se refiere a un grupo unitario de átomos o moléculas que define una distribución característica para un polímero. Los **polímeros** son materiales formados por cadenas de moléculas. Las cadenas tienen pesos moleculares promedio que van de 10 000 a más de un millón de g/mol y que se forman al unir muchos meros o unidades mediante un enlace químico para formar moléculas gigantes conocidas como macromoléculas. El peso molecular se define como la suma de las masas atómicas de cada molécula. La *polimerización* es un proceso mediante el cual pequeñas moléculas formadas por una unidad (conocida como **monómero**) o unas pocas unidades (conocidas como **oligómeros**) se unen químicamente para crear moléculas gigantes. Por lo común, la polimerización comienza con la producción de largas cadenas en las que los átomos están fuertemente unidos mediante un enlace covalente. Casi todos los polímeros son orgánicos, lo cual significa que son de base de carbono, pero también pueden ser inorgánicos (por ejemplo las siliconas basadas en una red Si-O).

Los **plásticos** son materiales compuestos principalmente de polímeros de origen natural y modificado, o de polímeros hechos en forma artificial que a veces contienen fibras, rellenos, pigmentos y otros materiales similares que mejoran aún más sus propiedades. Entre los plásticos se encuentran los termoplásticos, termoesfables y elastómeros (naturales o sintéticos). En este libro se utiliza indistintamente los términos plástico o polímero.

Los plásticos se utilizan en una increíble cantidad de aplicaciones, incluyendo prendas de vestir, juguetes, enseres domésticos, elementos estructurales y decorativos, recubrimientos, pinturas, adhesivos, neumáticos para automóviles, materiales biomédicos, defensas e interiores para autos, espumas y empaques. Los polímeros se utilizan

con frecuencia en materiales compuestos, tanto en forma de fibras como de matriz. Las pantallas de cristal líquido (LCD) se fabrican a base de polímeros. También se utilizan polímeros en lentes fotocromáticos. Los plásticos también se usan para fabricar componentes electrónicos debido a su capacidad aislante y a su constante dieléctrica baja. Recientemente, se han logrado adelantos significativos en el área de dispositivos electrónicos flexibles basados en las propiedades útiles de piezoelectricidad, semiconductividad, óptica y electroóptica que se encuentran en algunos polímeros. Los polímeros como el acetato de polivinilo (PVA) son solubles en agua. Muchos de estos polímeros se pueden disolver en agua o en solventes orgánicos para utilizarse como aglutinantes, surfactantes o plastificantes en el procesamiento de materiales cerámicos, semiconductores y como aditivos para muchos productos de consumo. El butiral polivinilo (PVB), un polímero, forma parte de los vidrios laminados que se utilizan en parabrisas de automóviles (capítulo 15). Posiblemente los polímeros se utilizan en más campos de actividad tecnológica que cualquier otra clase de materiales.

Los *polímeros comerciales*, o *materias primas estándar*, son materiales ligeros, resistentes a la corrosión, de baja resistencia y rigidez y no son adecuados para usarse a elevadas temperaturas. No obstante, estos polímeros son relativamente económicos y se pueden moldear con toda facilidad en una gran diversidad de formas, desde bolsas de plástico a engranajes mecánicos hasta tinas de baño. Los *polímeros ingenieriles* están diseñados para dar una mejor resistencia o mayor rendimiento a altas temperaturas. Estos materiales se producen en cantidades relativamente pequeñas y suelen ser costosos. Algunos de los polímeros ingenieriles pueden funcionar a temperaturas de hasta 350 °C; otros, como las fibras, tienen resistencias superiores a las del acero.

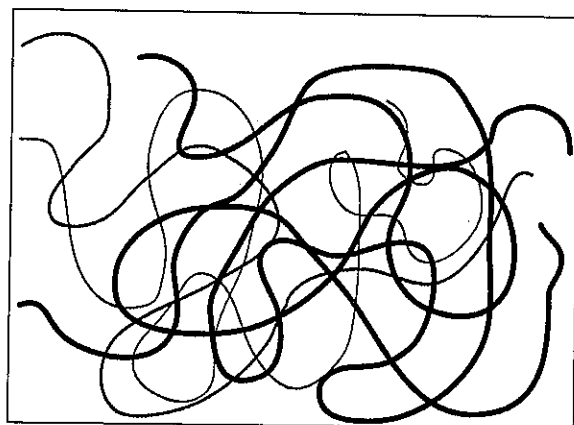
Los polímeros también tienen numerosas propiedades físicas útiles. Algunos, como los acrílicos Plexiglás™ y la Lucita™ son transparentes y pueden reemplazar al vidrio. Aun cuando la mayor parte de los polímeros son aislantes eléctricos, ciertos polímeros especiales (como los acetales) y los materiales compuestos base polímero poseen una conductividad eléctrica útil. El Teflón™ tiene un bajo coeficiente de fricción y es el recubrimiento que se emplea en utensilios de cocina antiadherentes. También, los polímeros resisten la corrosión y el ataque químico.

16-1 Clasificación de polímeros

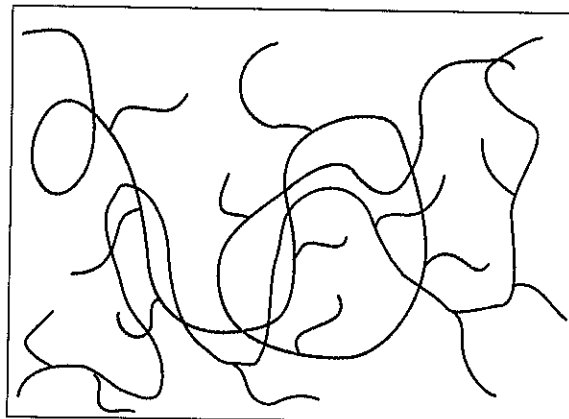
Los polímeros se clasifican de varias formas: según la síntesis de sus moléculas, según la estructura molecular o de acuerdo con la familia química a la que pertenecen. Una manera de clasificar los polímeros es establecer si se trata de un **polímero lineal** o de un **polímero ramificado** (figura 16-1). Un polímero lineal está formado de cadenas moleculares en forma de espagueti. En un polímero ramificado hay cadenas primarias de polímero y cadenas secundarias más pequeñas (ramales) que nacen de las cadenas principales. Observe que, aun cuando decimos "lineales", en realidad las cadenas no tienen formas de líneas rectas. Una mejor manera de describir los polímeros es en función de su comportamiento mecánico y térmico. En la tabla 16-1 se comparan las tres categorías principales de polímeros.

Los **termoplásticos** están formados de cadenas largas que se producen al unir monómeros; por lo general se comportan de una manera plástica y dúctil. Las cadenas pueden o no estar ramificadas. Las cadenas individuales están entrelazadas. Entre los átomos de cadenas diferentes existen enlaces de van der Waals relativamente débiles. Esto es algo similar a cuando unos cuantos árboles están agrupados. Los árboles pueden o no tener ramas, cada uno de ellos es independiente y no está conectado con ningún otro. En los termoplásticos las cadenas se pueden desenlazar mediante la aplicación de un esfuerzo de tensión. Los termoplásticos pueden ser amorfos o cristalinos. Al calentarse, se ablandan y funden. Se procesan en ciertas formas calentándolos a temperaturas elevadas. Los termoplásticos se pueden reciclar con facilidad.

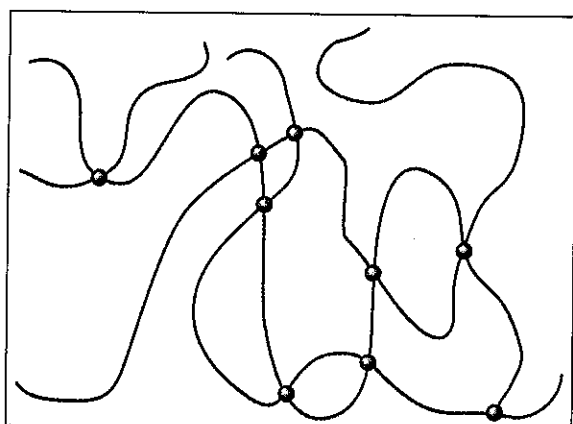
Los **polímeros termoestables** están constituidos por cadenas largas (lineales o ramificadas) de moléculas que están fuertemente unidas por enlaces cruzados, entrelazados, para



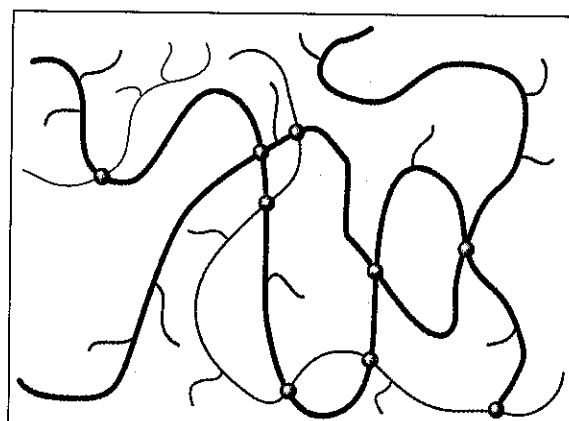
a) Lineal sin ramificación



b) Lineal ramificado



c) Termoestable sin ramificación



d) Termoestable ramificado

Figura 16-1 Esquema que muestra polímeros lineales y ramificados. Nótese que la ramificación puede ocurrir en cualquier tipo de polímero, por ejemplo termoplásticos, termoestables y elastómeros. a) Polímero lineal no ramificado: obsérvese que las cadenas no forman líneas rectas y no están conectadas. Se muestran distintas cadenas poliméricas mediante diferentes tonos y diseños para mostrar claramente que cada una de las cadenas no está conectada con otra. b) Polímero lineal ramificado: las cadenas no están conectadas pero tienen ramas. c) Polímero termoestable sin ramificación: las cadenas están conectadas entre sí mediante enlaces covalentes, pero no tienen ramificación. Los puntos de unión de resaltan mediante círculos llenos. d) Polímero termoestable que tiene ramificación y cadenas interconectadas mediante enlaces covalentes. Las cadenas y ramificaciones distintas aparecen en diferentes tonos para distinguirlas con mayor claridad. Los sitios donde las cadenas están realmente enlazadas aparecen en círculos llenos.

TABLA 16-1 ■ Comparación de las tres categorías de polímeros

Comportamiento	Estructura general	Ejemplo
Termoplástico	Cadenas lineales flexibles (con o sin ramificación)	Poliétileno
Termoestable	Réd rígida tridimensional (las cadenas pueden ser lineales o ramificadas)	Poliuretanos
Elastómeros	Termoplásticos o termoestables ligeramente entrelazados, consisten de moléculas semejantes a resortes	Caucho natural

formar estructuras de red tridimensionales. Los polímeros de red o termoestables se parecen a un manojo de hilos que están tejidos entre sí en varios sitios y no sólo enmarañados. Cada hilo puede tener otros hilos laterales unidos a él. Los plásticos termoestables son por lo general más fuertes pero más frágiles que los termoplásticos. Los termoestables no se funden al calentarlos sino que empiezan a descomponerse. No pueden ser reprocesados con facilidad después de que haya ocurrido la reacción de enlaces cruzados y, por tanto, el reciclaje es difícil.

Los **elastómeros** se conocen como cauchos. Tienen una deformación elástica $>200\%$. Es posible que se trate de termoplásticos o de termoestables ligeramente entrelazados. Las cadenas poliméricas tienen forma de moléculas en espiral que pueden estirarse de manera reversible al aplicárseles una fuerza.

Los **elastómeros termoplásticos** son un grupo especial de polímeros; tienen la facilidad de procesamiento de los termoplásticos y el comportamiento elástico de los elastómeros.

Estructuras representativas La figura 16-2 muestra tres maneras en que es posible representar un segmento de polietileno, el más simple de los termoplásticos. La cadena polimérica está formada de una cadena principal o columna vertebral de átomos de carbono; dos átomos de hidrógeno están enlazados a cada uno de los átomos de carbono de la cadena. La cadena se tuerce y gira en el espacio. En la figura, el polietileno no muestra ramificaciones, por lo que se trata de un termoplástico lineal. El modelo simple en dos dimensiones de la figura 16-2c) incluye los elementos esenciales de la estructura del polímero y se utilizará para describir los diversos polímeros. Las líneas sencillas (—) entre ambos átomos de carbono y entre átomos de carbono e hidrógeno representan un enlace covalente simple. Dos líneas paralelas (==) representan enlaces covalentes dobles entre átomos. Varios polímeros tienen estructuras en anillo, como el anillo de benceno, que se encuentra en el poliestireno y en otros polímeros (figura 16-3). Las moléculas que contienen el anillo de benceno de seis miembros se conocen como aromáticas.

En la estructura que aparece en la figura 16-2c), si se reemplaza uno de los átomos de hidrógeno en C_2H_4 con CH_3 , un anillo de benceno, o cloro, se obtiene la estructura del polipropileno, del poliestireno y del cloruro de polivinilo (PVC), respectivamente. Si en los grupos

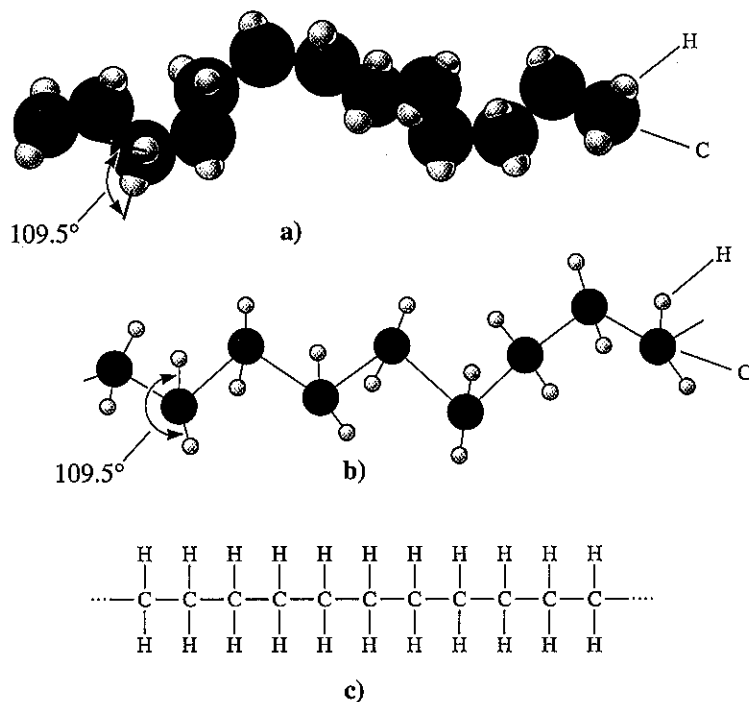


Figura 16-2 Tres formas de representar la estructura del polietileno: a) un modelo tridimensional sólido, b) un modelo tridimensional "espacial" y c) un modelo bidimensional simple.

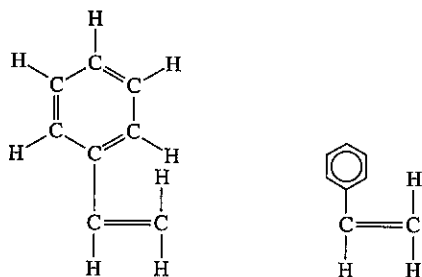


Figura 16-3

Dos formas de representar el anillo de benceno. En este caso, el anillo aparece conectado a un par de átomos de carbono, produciendo el estireno.

C_2H_4 se sustituyen todos los átomos H con flúor (F), se obtiene la estructura del politetrafluoretileno, es decir, Teflón™. Igual que muchos otros descubrimientos, el Teflón™ también fue descubierto por accidente. Muchas estructuras poliméricas pueden derivarse a partir de la estructura del polietileno. El siguiente ejemplo muestra la manera en que se utilizan los diferentes tipos de polímeros.

Ejemplo 16-1

Diseño/selección de materiales para componentes poliméricos

Diseñe el tipo de material polimérico que seleccionaría para las siguientes aplicaciones: guantes para cirugía, un envase para bebidas y una polea.

SOLUCIÓN

El guante debe poder estirarse mucho, a fin de deslizarse en la mano del cirujano y, al mismo tiempo, debe seguir con fidelidad el contorno de la mano para permitir el máximo de sensación táctil durante la cirugía. Un material con grandes deformaciones elásticas, en particular ante un esfuerzo aplicado relativamente pequeño, puede resultar apropiado; este requisito describe a un elastómero.

El envase para bebidas debe fabricarse fácil y económicamente. Debe tener cierta ductilidad y tenacidad a fin de que no se rompa ni deje salir el contenido. Si la bebida es gaseosa, una preocupación importante sería la difusión del CO_2 (capítulo 5). Un termoplástico, por ejemplo el tereftalato de polietileno (PET), tendrá la ductilidad y formabilidad necesarias para esta aplicación. También puede reciclarse con facilidad.

La polea deberá estar sujeta a algún esfuerzo y desgaste conforme la banda le pasa por encima. Se requiere un material relativamente resistente, rígido y duro para evitar el desgaste, por lo que un polímero termoestable podría resultar el más apropiado.

16-2 Polimerización por adición y condensación

La polimerización por **adición** y por **condensación** son las dos principales maneras de crear un polímero. Los polímeros que resultan de estos procesos se conocen como polímeros por adición y condensación, respectivamente. La formación del polímero más común, el polietileno (PE) a partir de moléculas de etileno, es un ejemplo de polimerización por adición, es decir, por crecimiento de cadenas. El etileno, que es un gas, es el monómero (unidad individual) y tiene como fórmula C_2H_4 . Los dos átomos de carbono están unidos por un enlace covalente doble. Cada átomo de carbono comparte dos de sus electrones con el otro átomo de carbono, y dos átomos de hidrógeno están enlazados de manera covalente con cada uno de los átomos de carbono (figura 16-4).

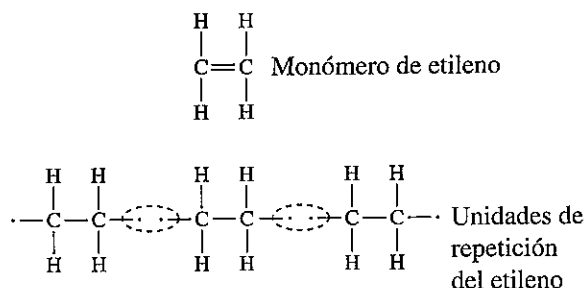


Figura 16-4

Reacción de adición para producir polietileno a partir de moléculas de etileno. El enlace doble no saturado del monómero se deshace para producir sitios activos, los cuales atraen posteriormente unidades de repetición adicionales a cualquiera de sus extremos, para producir una cadena.

En presencia de una combinación apropiada de calor, presión y catalizadores, se rompe el enlace doble entre los átomos de carbono y es reemplazado por un enlace covalente simple. Los extremos del monómero son ahora *radicales libres*; cada átomo de carbono tiene un electrón sin pareja que puede compartir con otros radicales libres. La polimerización por adición ocurre debido a que el monómero original contiene un enlace covalente doble entre los átomos de carbono. El enlace doble es un **enlace no saturado**. Después de su transformación a un enlace simple, los átomos de carbono todavía están unidos, pero se convierten en activos; se pueden agregar otras **unidades de repetición** o meros para producir la cadena polimérica.

Terminación de la polimerización por adición Se necesitan polímeros que tengan un peso molecular promedio y una distribución de peso molecular controlados. Por tanto, las reacciones de polimerización deberán tener algún interruptor para “apagarla”. Las cadenas pueden terminarse mediante dos mecanismos (figura 16-5). Primero,

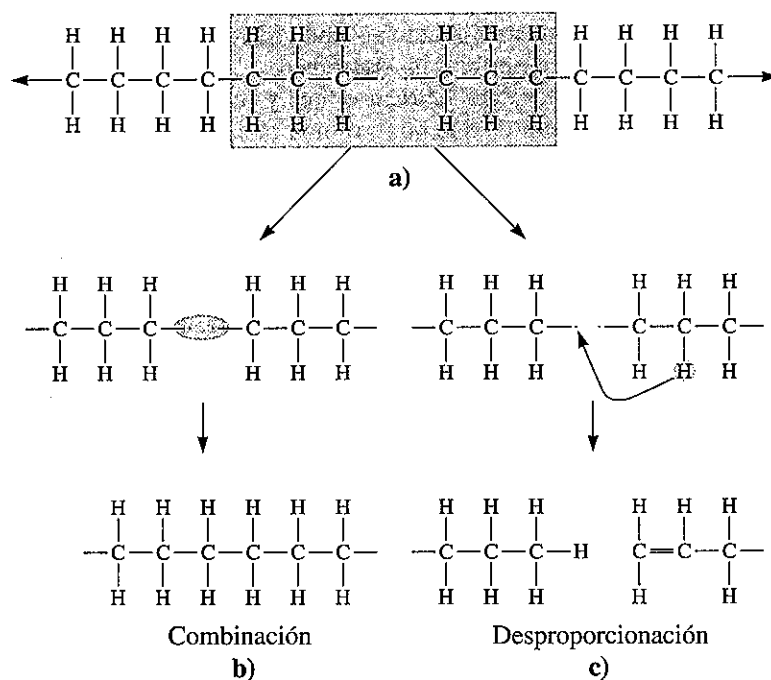


Figura 16-5 Terminación del crecimiento de cadenas de polietileno: a) los extremos activos de dos cadenas se acercan entre sí, b) las dos cadenas sufren una combinación y forman una cadena larga y c) el reordenamiento de un átomo de hidrógeno y la creación de un enlace covalente doble por desproporciónación causa la terminación de dos cadenas.

los extremos de dos cadenas pueden unirse. Este proceso, conocido como *combinación*, crea una sola cadena larga a partir de dos más cortas. Segundo, el extremo activo de una de las cadenas puede remover un átomo de hidrógeno de una segunda cadena utilizando un proceso conocido como *desproporciónación*. Esta reacción termina dos cadenas, en vez de combinarlas en una más grande. A veces, se agregan compuestos químicos conocidos como terminadores, para terminar las reacciones de polimerización. En general, en los materiales termoplásticos, cuanto mayor sea el peso molecular promedio, más elevada será la temperatura de fusión y mayor el módulo de Young del polímero (sección 16-3). El siguiente ejemplo ilustra una reacción de polimerización por adición.

Ejemplo 16-2 Cálculo del iniciador requerido

Calcule la cantidad del iniciador de peróxido de benzoílo $[(C_6H_5CO)_2O_2]$ que se requiere para producir 1 kg de polietileno con un peso molecular promedio de 200 000 g/mol. Cada molécula de peróxido de benzoílo produce dos radicales libres que son cada uno capaces de iniciar una cadena de polietileno. Suponga que 20% del iniciador en realidad es eficiente y que todas las terminaciones ocurren por el mecanismo de combinación.

SOLUCIÓN

Una molécula de peróxido de benzoílo produce dos radicales libres que inician dos cadenas que luego se combinan para formar una cadena de polietileno. En esta forma, hay una relación de 1:1 entre las moléculas de peróxido de benzoílo y las cadenas de polietileno. Si el iniciador fuera 100% efectivo, se requeriría una molécula de peróxido de benzoílo por cada cadena de polietileno.

Para determinar la cantidad de peróxido de benzoílo requerida, debe calcularse el número de cadenas con un peso molecular de 200 000 g/mol en 1 kg de polietileno.

El peso molecular del etileno = (2 átomos de C)(12 g/mol) + (4 átomos de H)(1 g/mol) = 28 g/mol. El número de moléculas por cadena (también conocido como el grado de polimerización) está dado por

$$\frac{200\,000\text{ g/mol}}{28\text{ g/mol}} = 7143\text{ moléculas de etileno por cadena}$$

El número total de monómeros requerido para formar 1 kg de polietileno es

$$\frac{(1000\text{ g})(6.022 \times 10^{23}\text{ monómeros/mol})}{28\text{ g/mol}} = 215 \times 10^{23}\text{ monómeros}$$

Entonces, el número de cadenas de polietileno en 1 kg es

$$\frac{215 \times 10^{23}\text{ moléculas de etileno}}{7143\text{ moléculas de etileno por cadena}} = 3.0 \times 10^{21}\text{ cadenas}$$

Como el iniciador de peróxido de benzoílo es sólo 20% eficiente, se requieren $5(3.0 \times 10^{21}) = 1.5 \times 10^{22}$ moléculas de peróxido de benzoílo para iniciar 3.0×10^{21} cadenas.

El peso molecular del peróxido de benzoílo es (14 átomos de C)(12 g/mol) + (10 átomos de H)(1 g/mol) + (4 átomos de O)(16 g/mol) = 242 g/mol. Por tanto, la cantidad de iniciador requerido es:

$$\frac{1.5 \times 10^{22} \text{ moléculas (242 g/mol)}}{6.022 \times 10^{23} \text{ moléculas/mol}} = 6.0 \text{ g}$$

Polimerización por condensación Las cadenas poliméricas también pueden formarse mediante reacciones de condensación, o polimerización de *crecimiento por pasos*, produciendo estructuras y propiedades parecidas a las de los polímeros por adición. En la polimerización por condensación, se forma una molécula relativamente pequeña, por ejemplo agua, etanol, metanol, etc., como resultado de la reacción de polimerización. Este mecanismo puede incluir diferentes monómeros como moléculas de inicio o precursoras. Un ejemplo importante es la polimerización del dimetiltereftalato y del etilenglicol (que también se utiliza como refrigerante en los radiadores de automóviles) para la producción del *poliéster* (figura 16-6). Durante la polimerización, se combina un átomo de oxígeno del extremo del monómero del etilenglicol con un grupo OCH₃ (metoxi) proveniente del dimetiltereftalato. Como subproducto se “condensa” alcohol metílico (CH₃OH) y los dos monómeros se combinan para producir una molécula más grande. Cada uno de los monómeros es bifuncional, lo cual significa que pueden reaccionar ambos extremos del monómero, y la polimerización por condensación puede continuar por la misma reacción. Finalmente, se produce una cadena larga de polímero, es decir un poliéster. La longitud de la cadena polimérica depende de la facilidad con la cual los monómeros pueden difundirse hacia los extremos y sufrir la reacción por condensación. El crecimiento de la cadena cesa cuando ya no llegan más monómeros a los extremos de la misma para que la reacción continúe. También pueden ocurrir reacciones de polimerización por condensación en el proceso sol-gel de los materiales cerámicos.

El siguiente ejemplo describe el descubrimiento del nylon, así como los cálculos relacionados con su polimerización por condensación.

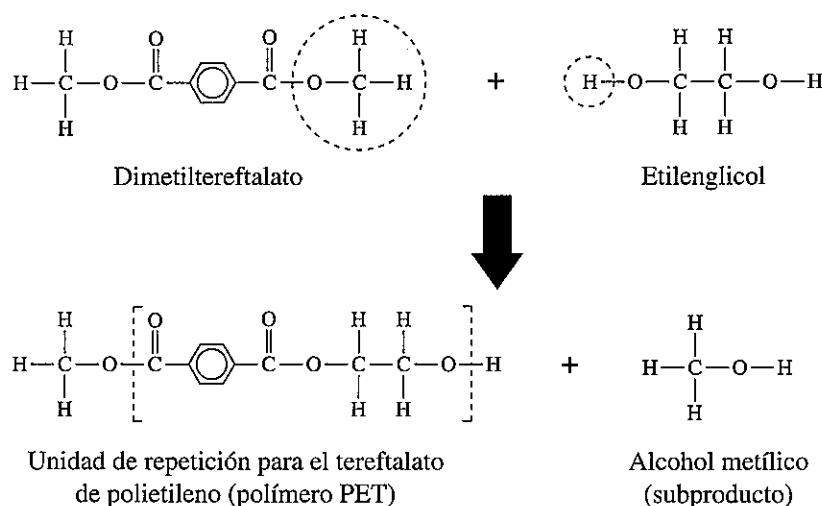
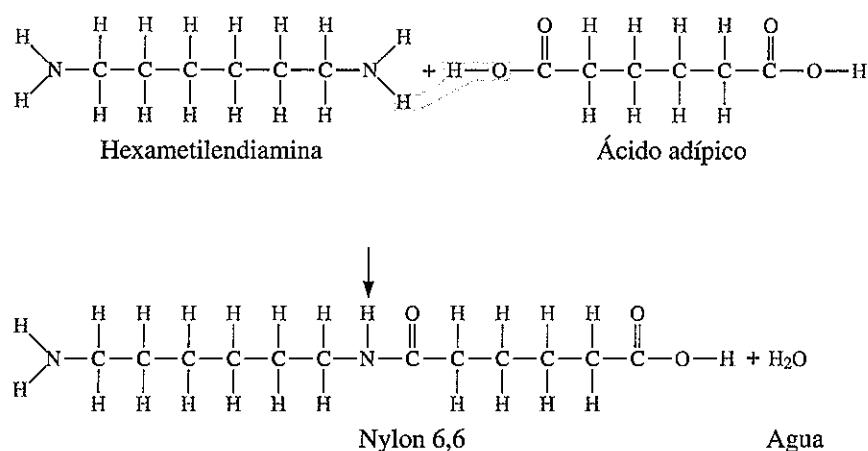


Figura 16-6 Reacción por condensación para el tereftalato de polietileno (PET), un poliéster común. De los monómeros se eliminan el grupo OCH₃ y un átomo de hidrógeno, permitiendo así la unión de ambos monómeros y produciendo alcohol metílico como subproducto.

Ejemplo 16-3

En 1934 Wallace Hume Carothers, de DuPont, informó por primera vez el descubrimiento del nylon. En 1939, Charles Stine, también de DuPont, presentó esta primera fibra sintética ante un grupo de 3000 señoras reunidas en ocasión de la Feria Mundial de Nueva York. Su primera aplicación fue una manufactura de medias de nylon verdaderamente resistentes. Hoy en día, el nylon se utiliza en cientos de aplicaciones. Antes del nylon, Carothers había descubierto el neopreno (un elastómero).

El nylon 6,6 es un polímero lineal que se produce combinando 1000 g de hexametildiamina con ácido adípico. Después, una reacción de condensación produce el polímero. Las estructuras moleculares de los monómeros se muestran a continuación. La cadena lineal del nylon se produce cuando un átomo de hidrógeno, de la diamina de hexametileno, se combina con un grupo OH del ácido adípico para formar una molécula de agua.



Nótese que la reacción puede continuar en ambos extremos de la nueva molécula, por lo que es posible formar cadenas largas. Este polímero se llama nylon 6,6 porque ambos monómeros contienen seis átomos de carbono.

¿Cuántos gramos de ácido adípico se necesitan y cuánto nylon 6,6 se produce, suponiendo una eficiencia de 100%?

SOLUCIÓN

Los pesos moleculares de la hexametildiamina, ácido adípico y agua son 116, 146 y 18 g/mol, respectivamente. El número de moles de hexametildiamina es igual al número de moles de ácido adípico:

$$\frac{1000 \text{ g}}{116 \text{ g/mol}} = 8.62 \text{ moles} = \frac{x \text{ g}}{146 \text{ g/mol}}$$

$x = \text{se requieren } 1259 \text{ g de ácido adípico}$

Se pierde una molécula de agua cuando la hexametildiamina reacciona con el ácido adípico. Cada vez que se agrega un monómero a la cadena, se pierde una molécula de agua. Entonces, cuando se forma una cadena larga, hay (en promedio) dos moléculas

de agua liberadas por cada unidad de repetición de la cadena (cada unidad de repetición formada a partir de dos monómeros). De este modo, el número de moles de agua perdidos es $2(8.62 \text{ moles}) = 17.24 \text{ moles}$ o sea

$$17.24 \text{ moles H}_2\text{O} (18 \text{ g/mol}) = 310 \text{ g H}_2\text{O}$$

La cantidad total de nylon producido es

$$1000 \text{ g} + 1259 \text{ g} - 310 \text{ g} = 1949 \text{ g}$$

16-3 Grado de polimerización

Los polímeros, a diferencia de los compuestos químicos orgánicos o inorgánicos, no tienen un peso molecular fijo. Por ejemplo, el polietileno puede tener un peso molecular que va desde ~25 000 hasta 6 millones. La longitud promedio de un polímero lineal está representada por el **grado de polimerización**, es decir, el número de unidades de repetición existentes en la cadena. El grado de polimerización también se puede definir como:

$$\text{Grado de polimerización} = \frac{\text{peso molecular promedio del polímero}}{\text{peso molecular de la unidad de repetición}} \quad (16-1)$$

Si el polímero sólo contiene un tipo de monómero, el peso molecular de la unidad de repetición es el del monómero; si el polímero contiene dos o más tipos de monómeros, el peso molecular de la unidad de repetición será la suma de los pesos moleculares de los monómeros, menos el peso molecular del subproducto.

Las longitudes de las cadenas en un polímero lineal varían considerablemente. Algunas pueden ser bastante cortas, debido a una terminación temprana; otras pueden resultar excepcionalmente largas. Se puede definir el peso molecular promedio de dos formas.

El *peso molecular promedio en peso* se obtiene dividiendo las cadenas en intervalos de tamaño y determinando la fracción de las cadenas con pesos moleculares dentro de dicho intervalo. El peso molecular promedio en peso $\bar{M}_w$ es

$$\bar{M}_w = \sum f_i M_i \quad (16-2)$$

donde M_i es el peso molecular medio de cada intervalo y f_i es la fracción en peso del polímero con cadenas dentro de este intervalo.

El *peso molecular promedio por números* $\bar{M}_n$ se basa en la fracción numérica, más que en la fracción en peso de las cadenas dentro de cada intervalo de tamaños. Siempre es menor que el peso molecular promedio en peso y está dado por

$$\bar{M}_n = \sum x_i M_i \quad (16-3)$$

donde M_i es otra vez el peso molecular medio de cada intervalo, pero x_i es la fracción del número total de cadenas dentro de cada intervalo. Se puede utilizar de manera indistinta $\bar{M}_w$ o $\bar{M}_n$ para calcular el grado de polimerización.

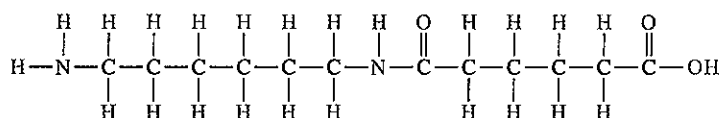
Los dos ejemplos siguientes ilustran estos conceptos.

Ejemplo 16-4 Grado de polimerización para el nylon 6,6

Calcule el grado de polimerización si el nylon 6,6 tiene un peso molecular de 120 000 g/mol.

SOLUCIÓN

La reacción mediante la cual se produce el nylon 6,6 se describe en el ejemplo 16-3. La hexametilendiamina se combina con el ácido adípico y libera una molécula de agua. Cuando se forma una cadena larga, en promedio existe una molécula de agua liberada por cada molécula en reacción. Los pesos moleculares son 116 g/mol para la hexametilendiamina, 146 g/mol para el ácido adípico y 18 g/mol para el agua. La unidad de repetición para el nylon 6,6 es:



El peso molecular de la unidad de repetición es la suma de los pesos moleculares de los dos monómeros, menos el correspondiente a las dos moléculas de agua resultantes:

$$M_{\text{unidad de repetición}} = 116 + 146 - 2(18) = 226 \text{ g/mol}$$

$$\text{Grado de polimerización} = \frac{120\,000}{226} = 531$$

El grado de polimerización se refiere al número total de unidades de repetición existentes en la cadena.

Ejemplo 16-5 Pesos moleculares promedio en peso y por número

Se tiene una muestra de polietileno que contiene 4000 cadenas con pesos moleculares entre 0 y 5000 g/mol, 8000 cadenas con pesos moleculares entre 5000 y 10 000 g/mol, 7000 cadenas con pesos moleculares entre 10 000 y 15 000 g/mol y 2000 cadenas con pesos moleculares entre 15 000 y 20 000 g/mol. Determine el peso molecular promedio tanto por número como en peso.

SOLUCIÓN

Primero es necesario determinar la fracción numérica x_i y la fracción en peso f_i para cada uno de los cuatro intervalos. En el caso de x_i , simplemente se divide el número en cada intervalo entre 21 000, que es el número total de cadenas. Para determinar f_i , primero se multiplica el número de cadenas por el peso molecular promedio de las mismas en cada intervalo, con lo que se obtiene el “peso” de cada grupo, y después se encuentra f_i dividiendo entre el peso total de 192.5×10^6 . Entonces se podrán utilizar las ecuaciones 16-2 y 16-3 para determinar los pesos moleculares.

Número de cadenas	M medio por cadena	x_i	$x_i M_i$	Peso	f_i	$f_i M_i$
4000	2500	0.191	477.5	10×10^6	0.0519	129.75
8000	7500	0.381	2857.5	60×10^6	0.3118	2338.50
7000	12 500	0.333	4162.5	87.5×10^6	0.4545	5681.25
2000	17 500	0.095	1662.5	35×10^6	0.1818	3181.50
$\Sigma = 21\ 000$		$\Sigma = 1.00$	$\Sigma = 9160$	$\Sigma = 192.5 \times 10^6$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 11\ 331$

$$\bar{M}_n = \sum x_i M_i = 9160 \text{ g/mol}$$

$$\bar{M}_w = \sum f_i M_i = 11\ 331 \text{ g/mol}$$

El peso molecular promedio en peso es mayor que el peso molecular promedio por número de cadenas.

16-4 Termoplásticos comunes

Algunas de las propiedades mecánicas de los termoplásticos comunes aparecen en la tabla 16-2. La tabla 16-3 muestra las unidades de repetición y aplicaciones para varios termoplásticos formados por polimerización por adición.

TABLA 16-2 ■ Propiedades de termoplásticos seleccionados

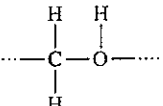
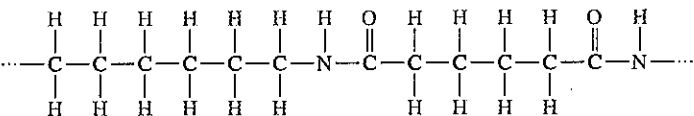
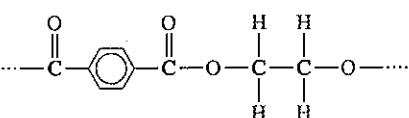
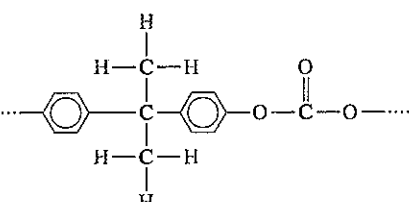
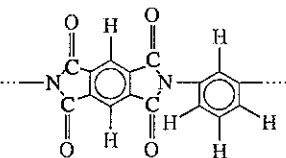
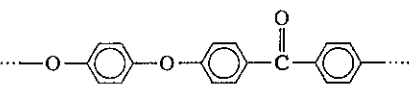
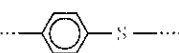
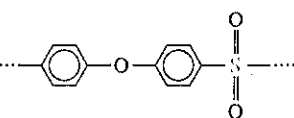
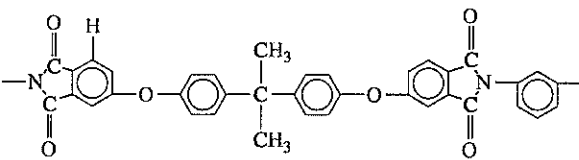
	Resistencia a la tensión (psi)	% de alargamiento	Módulo elástico (psi)	Densidad (g/cm ³)	Impacto Izod (ft lb/pulg)
Poliétileno (PE):					
Baja densidad	3 000	800	40 000	0.92	9.0
Alta densidad	5 500	130	180 000	0.96	4.0
Peso molecular ultraalto	7 000	350	100 000	0.934	30.0
Cloruro de polivinilo (PVC)	9 000	100	600 000	1.40	
Polipropileno (PP)	6 000	700	220 000	0.90	1.0
Poliestireno (PS)	8 000	60	450 000	1.06	0.4
Poliacrilonitrilo (PAN)	9 000	4	580 000	1.15	4.8
Polimetilmetacrilato (PMMA) (acrílico, plexiglás)	12 000	5	450 000	1.22	0.5
Policlorotrifluoroetileno	6 000	250	300 000	2.15	2.6
Politetrafluoretileno (PTFE, Teflón)	7 000	400	80 000	2.17	3.0
Polioximetileno (POM) (acetal)	12 000	75	520 000	1.42	2.3
Poliámidas (PA) (nylon)	12 000	300	500 000	1.14	2.1
Poliéster (PET)	10 500	300	600 000	1.36	0.6
Polycarbonato (PC)	11 000	130	400 000	1.20	16.0
Políimida (PI)	17 000	10	300 000	1.39	1.5
Polietereterketona (PEEK)	10 200	150	550 000	1.31	1.6
Sulfuro de polifenileno (PPS)	9 500	2	480 000	1.30	0.5
Sulfona de poliéster (PES)	12 200	80	350 000	1.37	1.6
Poliámidaimida (PAI)	27 000	15	730 000	1.39	4.0

TABLA 16-3 ■ Unidades de repetición y aplicaciones de termoplásticos por adición seleccionados

Polímero	Unidad de repetición	Aplicación	Polímero	Unidad de repetición	Aplicación
Poliétileno (PE)	$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \cdots - \text{C} - & \text{C} - \cdots \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array}$	Películas de empaque, aislamientos para alambre, botellas comprimibles, tuberías, artículos para el hogar	Poliacrilonitrilo (PAN)	$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \cdots - \text{C} - & \text{C} - \cdots \\ & \\ \text{H} & \text{C} \equiv \text{N} \end{array}$	Fibras textiles, precursores para fibras de carbono, recipientes para alimentos
Cloruro de polivinilo (PVC)	$\begin{array}{c} \text{H} & \text{Cl} \\ & \\ \cdots - \text{C} - & \text{C} - \cdots \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array}$	Tuberías, válvulas, acoplamientos, loseta vinílica, aislamientos para alambres, techos de vinilo para autos	Polimetilmetacrilato (PMMA) (acrílico Plexiglas)	$\begin{array}{c} & \text{H} & \\ & & \\ \text{H} & - \text{C} - & \text{H} \\ & & \\ \cdots - \text{C} - & \text{C} - \cdots \\ & & \\ \text{H} & \text{C} = \text{O} & \\ & & \\ & \text{O} & \\ & & \\ \text{H} - & \text{C} - & \text{H} \\ & & \\ & \text{H} & \end{array}$	Ventanas, parabrisas, recubrimientos, lentes de contacto duros, señalamientos iluminados
Polipropileno (PP)	$\begin{array}{c} \text{H} & & \text{H} \\ & & \\ \cdots - \text{C} - & \text{C} - \cdots \\ & & \\ \text{H} & & \text{H} - \text{C} - \text{H} \\ & & \\ & & \text{H} \end{array}$	Depósitos, fibras para alfombras, cuerdas, empaques			
Poliestireno (PS)	$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \cdots - \text{C} - & \text{C} - \cdots \\ & \\ \text{H} & \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$	Empaques y espumas aislantes, paneles de iluminación, componentes de aparatos, empaques para huevo	Policlorotrifluoretileno	$\begin{array}{c} \text{F} & \text{Cl} \\ & \\ \cdots - \text{C} - & \text{C} - \cdots \\ & \\ \text{F} & \text{F} \end{array}$	Componentes de válvulas, juntas, tuberías, aislamiento eléctrico
			Politetrafluoretileno (Teflón) (PTFE)	$\begin{array}{c} \text{F} & \text{F} \\ & \\ \cdots - \text{C} - & \text{C} - \cdots \\ & \\ \text{F} & \text{F} \end{array}$	Sellos, válvulas, recubrimientos antiadherentes

Termoplásticos con estructuras complejas Un gran número de polímeros, que en general se utilizan en aplicaciones especiales y en cantidades relativamente pequeñas, se forma a partir de monómeros complejos y con frecuencia mediante el mecanismo de condensación. En la cadena pueden incorporarse el oxígeno, el nitrógeno, el azufre y anillos de benceno (o grupos aromáticos). En la tabla 16-4 se muestran las unidades de repetición y las aplicaciones comunes para varios de estos polímeros complejos. El polioximetileno, es decir, el acetal, es un ejemplo sencillo en el que la columna vertebral de la cadena polimérica contiene átomos alternados de carbono y de oxígeno. Varios de estos polímeros, incluyendo las poliimidas y el polietereeterketona (PEEK), son materiales importantes empleados en la industria aeroespacial. Debido a que el enlace dentro de las cadenas es más fuerte en comparación con los polímeros por adición que son más sencillos, la rotación y el deslizamiento de las cadenas es más difícil; esto lleva a lograr mayor resistencia, mayor rigidez y puntos de fusión más altos. En algunos casos, es posible obtener buenas propiedades al impacto a partir de estas cadenas complejas, en las que los policarbonatos son particularmente notables. Los policarbonatos (LexanTM, MerlonTM y SparluxTM, se usan en la construcción de ventanas a prueba de balas, discos compactos para almacenar información y en numerosas aplicaciones.

TABLA 16-4 ■ Unidades de repetición y aplicaciones para termoplásticos complejos

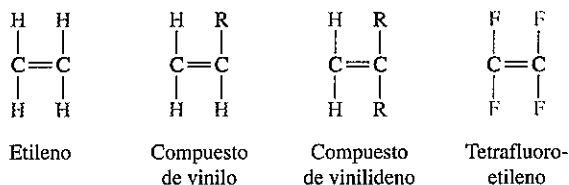
Polímero	Unidad de repetición	Aplicaciones
Polioximetileno (acetal) (POM)		Accesorios de plomería, bolígrafos, cojinetes, engranes, aspas de ventilador
Poliamida (nylon) (PA)		Cojinetes, engranes, fibras, cuerdas, componentes para autos, componentes eléctricos
Poliéster (PET)		Fibras, película fotográfica, cintas para grabación, bolsas para hervir, recipientes para bebidas
Polycarbonato (PC)		Carcasas eléctricas y aparatos domésticos, componentes para autos, cascos para futbolistas, botellas retornables, discos compactos (CD)
Poliimida (PI)		Adhesivos, tableros de circuitos, fibras para el transbordador espacial
Polietereterketona (PEEK)		Aislamiento eléctrico y recubrimientos de alta temperatura
Sulfuro de polifenileno (PPS)		Recubrimientos, componentes para manejo de fluidos, componentes electrónicos, componentes para secadoras de pelo
Sulfona de poliéster (PES)		Componentes eléctricos, cafeteras, secadoras de pelo, componentes para hornos de microondas
Poliamidaimida (PAI)		Componentes electrónicos, aplicaciones en la industria aeroespacial y automotriz

16-5 Relaciones estructura-propiedades en termoplásticos

Grado de polimerización En general, para un tipo determinado de termoplástico, por ejemplo el polietileno, la resistencia a la tensión, la resistencia a la termofluencia, la tenacidad al impacto, la resistencia al desgaste y la temperatura de fusión aumentan, todas ellas, al incrementarse el peso molecular promedio o el grado de polimerización. Los incrementos en estas propiedades no son lineales. Conforme aumenta el peso molecular promedio, se eleva la temperatura de fusión y esto hace que el procesamiento sea más difícil. De hecho, es posible utilizar una distribución bimodal del peso molecular en el procesamiento del polímero. Un componente es de un peso molecular menor y ayuda a la fusión, con lo cual el procesamiento es más fácil.

Efecto de los grupos laterales En el polietileno, las cadenas lineales giran y se deslizan con facilidad al aplicarse un esfuerzo, y no se forman enlaces polares fuertes entre las cadenas; por tanto, el polietileno tiene una baja resistencia.

Los *compuestos de vinilo* tienen uno de los átomos de hidrógeno sustituido por un átomo o grupo de átomos diferente. Cuando R en el grupo lateral es cloro, se produce cloruro de polivinilo (PVC); cuando el grupo lateral es CH_3 , se produce polipropileno (PP); la adición de un anillo de benceno da poliestireno (PS), y un grupo CN produce poliacrilonitrilo (PAN).



Cuando se sustituyen dos de los átomos de hidrógeno, el monómero es un *compuesto de vinilideno*, ejemplos importantes del mismo incluyen el cloruro de polivinilideno (base para el Saran Wrap™) y el metacrilato de polimetilo (acrílicos como Lucita™ y Plexiglas™). En general, resulta una distribución de cabeza a cola de las unidades de repetición en los polímeros (figura 16-7). La distribución de cabeza a cola es la más común.

El efecto de agregar otros átomos o grupos de átomos a la espina dorsal de carbono, en sustitución de átomos de hidrógeno, se ilustra en las propiedades comunes incluidas en la tabla 16-2. Los átomos grandes, como el cloro, o los grupos de átomos como el metilo (CH_3) y el benceno dificultan la rotación de las cadenas, su estirado, desenmarañado y deformado por flujo viscoso al aplicarse un esfuerzo o al aumentar la temperatura. Esta situación conduce a una mayor resistencia, rigidez y a una temperatura de fusión más alta que las correspondientes al polietileno. El átomo de cloro en el PVC y el grupo de carbono-nitrógeno en el PAN son fuertemente atraídos por uniones hidrógeno con los átomos de hidrógeno de cadenas adya-

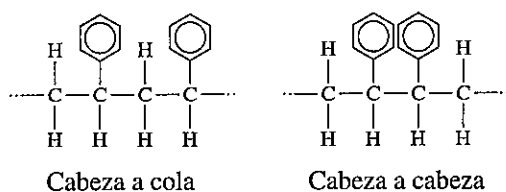


Figura 16-7

Configuración cabeza a cola contra cabeza a cabeza de unidades de repetición. La configuración más común es cabeza a cola.

centes. Ésta es, por ejemplo, la razón por la que el PVC es más rígido que muchos otros polímeros. Una manera de evitar la rigidez del PVC es agregar materiales compuestos de bajo peso molecular como los ésteres de ftalato, conocidos como plastificantes. Cuando el PVC contiene estos materiales compuestos, se reduce la temperatura de transición vítrea. Con ello el PVC se hace más dúctil y más manejable y se conoce como vinilo (que no debe confundirse con el grupo vinilo antes citado aquí y en otros lugares). El PVC se utiliza para hacer carpetas de tres argollas, tuberías, losas y tubo transparente TygonTM.

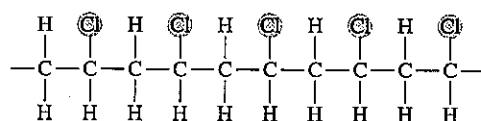
En el politetrafluoroetileno (PTFE o TeflónTM), los cuatro átomos de hidrógeno de la estructura del polietileno son reemplazados por flúor. El monómero, de nuevo, es simétrico y su resistencia no es mucho mayor que la del polietileno. Sin embargo, los enlaces C-F permiten que el PTFE tenga un elevado punto de fusión, con la ventaja adicional de una baja fricción, y de características antiadherentes que lo hacen útil para cojinetes y para utensilios de cocina. El TeflónTM fue inventado por casualidad por Roy Plunkett, quien trabajaba con gas de tetrafluoroetileno. Se encontró con un cilindro de gas de tetrafluoroetileno que no tenía presión, y por tanto parecía estar vacío, pero que pesaba más de lo normal. En su interior, el gas se había polimerizado en teflón sólido.

La *ramificación* impide que las cadenas estén estrechamente empaquetadas, reduciendo así la densidad, rigidez y resistencia del polímero. El polietileno de baja densidad (LPDE), que tiene muchas ramificaciones, es más débil que el polietileno de alta densidad (HDPE) que prácticamente no tiene ramificaciones (tabla 16-2).

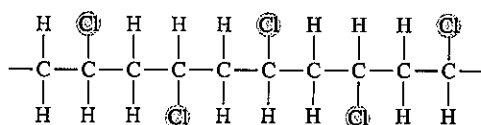
Cristalización y deformación La *cristalinidad* es importante en los polímeros, ya que afecta sus propiedades mecánicas y ópticas. La cristalinidad se presenta durante el procesamiento de los polímeros como resultado de cambios en la temperatura y de esfuerzos aplicados (por ejemplo, la formación de botellas PET, analizada en capítulos anteriores). Si las regiones cristalinas se hacen demasiado grandes, empiezan a dispersar la luz y hacen translúcido al plástico. En ciertos polímeros especiales, regiones localizadas se cristalizan en respuesta a un campo eléctrico aplicado; éste es el principio del funcionamiento de las pantallas de cristal líquido. Se estudiará esto en detalle en la siguiente sección. La cristalización del polímero también ayuda a incrementar su densidad, resistencia al ataque químico y propiedades mecánicas, incluso a temperaturas más elevadas, debido a la fuerte unión existente entre las cadenas. Además, la deformación que endereza y alinea las cadenas y que lleva a la cristalización, también produce una orientación preferente. Con frecuencia se utiliza la deformación de un polímero con objeto de producir fibras con propiedades mecánicas en la dirección de la fibra que excedan las de muchos metales y materiales cerámicos. Este reforzamiento por textura desempeñó, de hecho, una función clave en el descubrimiento de las fibras de nylon. En capítulos anteriores se ha visto cómo las botellas de PET desarrollan una textura y resistencia biaxial en la dirección radial y longitudinal.

Tacticidad Cuando se forma un polímero a partir de unidades de repetición no simétricas, su estructura y propiedades quedan determinadas por la localización de los átomos o grupos de átomos no simétricos. Esta condición se conoce como **tacticidad**, es decir, estereoisomerismo. En la configuración *sindiotáctica*, los átomos o grupos de átomos ocupan alternativamente posiciones en los lados opuestos de la cadena lineal. En los polímeros *isotáticos*, los átomos están todos en el mismo lado de la cadena; en tanto que, en los polímeros *atáticos*, la configuración de átomos es aleatoria (figura 16-8).

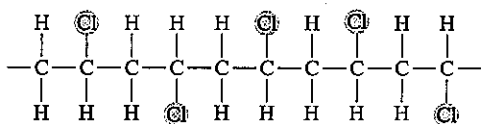
La estructura atáctica, que es la menos regular y la menos predecible, tiende a generar un empaquetamiento deficiente, densidad baja, resistencia y tenacidad bajas, así como poca resistencia al calor o al ataque químico. Los polímeros atáticos tienen mayores posibilidades de presentar una estructura amorfa. Un buen ejemplo de la importancia de la tacticidad ocurre en el polipropileno. El polipropileno atático es un polímero amorfo parecido a la cera, de malas propiedades mecánicas, en tanto que el polipropileno isotático puede cristalizarse y es uno de los polímeros comerciales de más uso.



a)



b)



c)

Figura 16-8

Tres configuraciones posibles de monómeros no simétricos: a) isotácticos, b) sindiotácticos y c) atácticos.

Copolímeros De manera similar al concepto de las soluciones sólidas o a la idea de los materiales compuestos, las cadenas lineales por adición compuestas de dos o más tipos de moléculas pueden organizarse para formar **copolímeros**. Ésta es una forma muy poderosa de combinar las propiedades de diferentes polímeros. El arreglo de los monómeros dentro del copolímero puede tomar varias formas (figura 16-9). Estas formas incluyen copolímeros alternados, aleatorios, en bloques o injertados. El ABS, compuesto por acrilonitrilo, butadieno (un elastómero sintético) y estireno, es uno de los materiales poliméricos más comunes (figura 16-10). El estireno y el acrilonitrilo forman un copolímero lineal (SAN) que sirve como matriz. El estireno y el butadieno también forman un copolímero lineal, el caucho BS, que actúa como material de relleno. La combinación de los dos copolímeros da al ABS una excelente combinación de rigidez, resistencia y tenacidad. Otro copolímero común contiene unidades de repetición de etileno y de propileno. Aun cuando el polietileno y el polipropileno son fácilmente cristalizables, el copolímero se conserva amorfo. Cuando este polímero se entrelaza, se comporta como un elastómero. El Dylark™ es un copolímero de anhídrido maleico y de estireno. El estireno aporta la tenacidad, en tanto que el anhídrido maleico aporta propiedades a altas temperaturas. Al copolímero Dylark™ se le agrega negro de carbono (para protegerlo de los rayos ultravioleta y mejorar la rigidez), caucho (para obtener tenacidad) y fibras de vidrio (para mayor rigidez). Se utiliza en tableros de instrumentos en automóviles. Después, el plástico Dylark™ se recubre con vinilo, que le da un terminado liso y blando.

Mezclas y aleaciones Se pueden mejorar las propiedades mecánicas de muchos de los termoplásticos por medio de la mezcla y la aleación. Al mezclar un elastómero no miscible con el termoplástico, se produce un polímero de dos fases, como se vio en el ABS. El elastómero no se introduce en la estructura como copolímero, sino que ayuda a absorber energía y mejorar la tenacidad. También los policarbonatos que se utilizan para producir cubiertas corredizas transparentes para aeronaves se endurecen con elastómeros de esta manera.

Polímeros cristalinos líquidos Algunas de las cadenas termoplásticas complejas se hacen tan rígidas que se comportan como barras rígidas, incluso a altas temperaturas. Estos materiales son los **polímeros cristalinos líquidos** (LCP). Algunos poliésteres

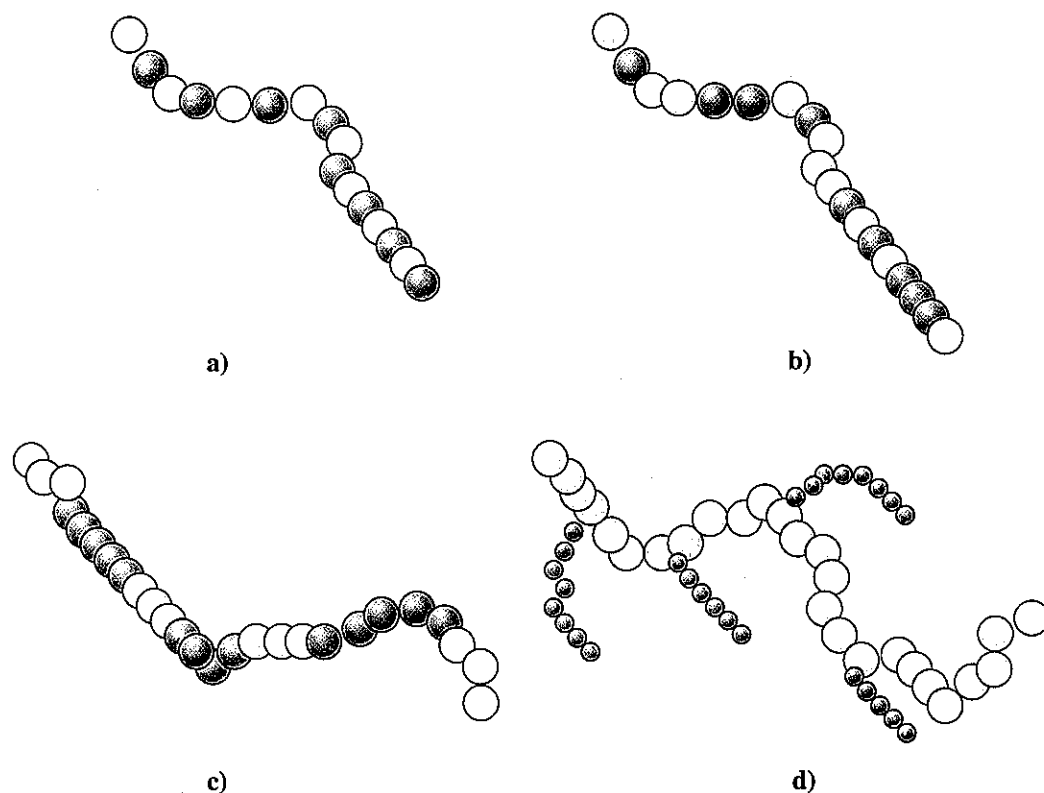


Figura 16-9 Cuatro tipos de copolímeros: a) monómeros alternos, b) monómeros aleatorios, c) copolímeros en bloque y d) copolímeros injertados. Los diferentes monómeros se han representado con círculos de tamaños o colores diferentes.

aromáticos y poliamidas aromáticas (o **aramidas**) son ejemplos de polímeros cristalinos líquidos y se utilizan como fibras de alta resistencia (como se verá en el capítulo 17). El Kevlar™, una poliamida aromática, es el LCP más conocido y se utiliza como fibra de refuerzo para aplicaciones aeroespaciales y para chalecos a prueba de balas. Los polímeros de cristal líquido (LC) se utilizan también para hacer pantallas electrónicas.

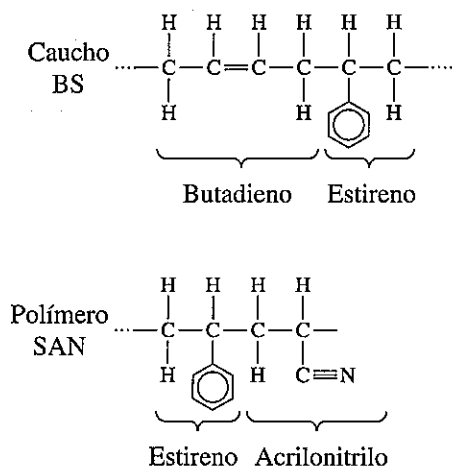


Figura 16-10

La copolimerización produce el polímero ABS, que está formado en realidad por dos copolímeros, el SAN y BS, injertados el uno en el otro.

16-6 Efecto de la temperatura en termoplásticos

Las propiedades de los termoplásticos cambian en función de la temperatura. Es necesario saber la forma en que ocurren estos cambios, ya que pueden ayudar a) a diseñar mejores componentes y b) a guiar el tipo de técnicas de procesamiento que deban utilizarse. Se pueden observar varias temperaturas y estructuras críticas, las cuales se resumen en las figuras 16-11 y 16-12.

Una vez que se hayan enfriado por debajo de la temperatura de fusión, los termoplásticos pueden ser amorfos o cristalinos (figura 16-11). Con mayor frecuencia, los termoplásticos ingenieriles están formados por regiones amorfas y cristalinas. La cristalinidad en los materiales termoplásticos puede introducirse por temperatura (enfriamiento lento) o mediante la aplicación de esfuerzos que desenmarañan cadenas (**cristalización inducida por esfuerzo**). De manera similar al endurecimiento por dispersión de los materiales metálicos, la formación de regiones cristalinas en una matriz que, por lo demás es amorfa, ayuda a incrementar la resistencia de los termoplásticos. En los materiales termoplásticos comunes, las uniones dentro de las cadenas son covalentes, pero las largas cadenas en espiral están "unidas" entre sí por débiles enlaces van der Waals y enmarañamiento. Cuando al termoplástico se le aplica un esfuerzo de tensión se puede superar la débil unión entre las cadenas, permitiendo que éstas giren y se deslicen una en relación a la otra. La facilidad con que dichas cadenas pueden deslizarse depende a la vez de la temperatura y de la estructura del polímero.

Temperatura de degradación A temperaturas muy altas pueden destruirse los enlaces covalentes entre los átomos dentro de la cadena lineal y el polímero puede quemarse o carbonizarse. En los polímeros termoplásticos, la descomposición se presenta en el estado líquido; en los termoestables, en el estado sólido. Esta temperatura T_d (que no aparece en la figura 16-12) es la **temperatura de degradación** o de descomposición. Cuando los

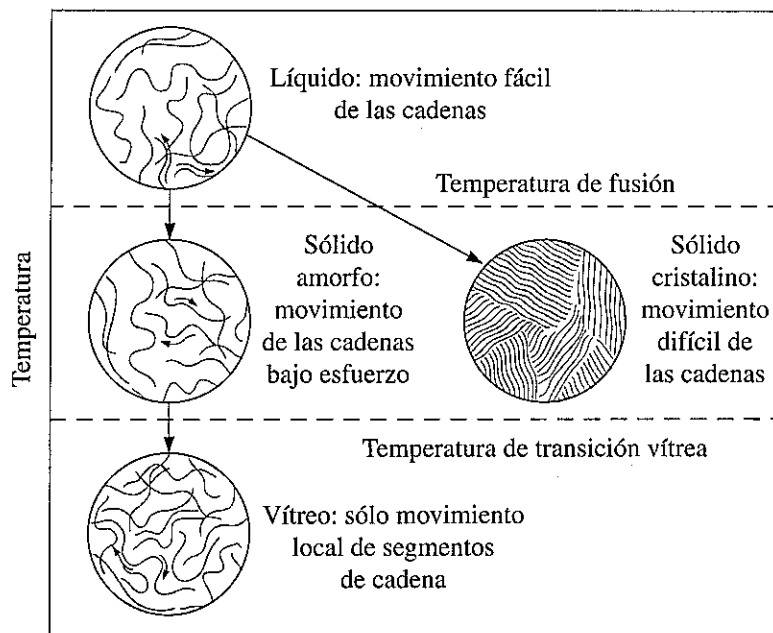


Figura 16-11 Efecto de la temperatura en la estructura y el comportamiento de los materiales termoplásticos.

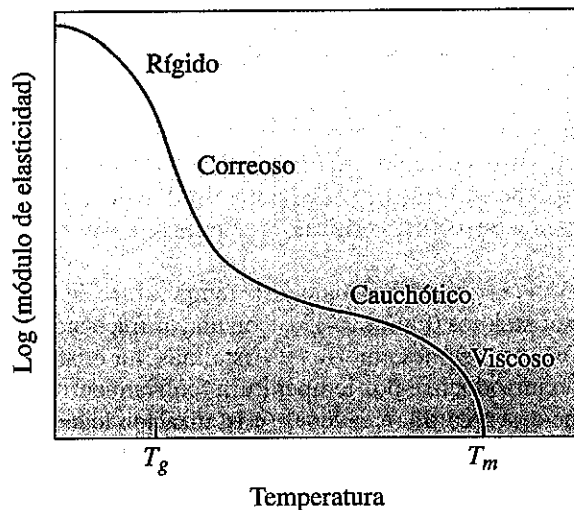


Figura 16-12

Efecto de la temperatura sobre el módulo de elasticidad en un polímero termoplástico amorfo. Nótese que T_g y T_m no son fijas.

plásticos se queman, generan humo, lo cual es peligroso. Algunos materiales agregados a los termoplásticos, por ejemplo piedra caliza, talco, alúmina, etc., actúan como estabilizadores térmicos, es decir, del calor. Absorben el calor, protegiendo la matriz polimérica. A fin de retardar la ignición de los polímeros se agregan aditivos retardadores del fuego, por ejemplo alúmina hidratada, materiales compuestos de antimonio o de halógenos (como el $MgBr$, PCl_5). Algunos aditivos son retardadores del fuego al excluir el oxígeno pero generan gases dañinos y no son apropiados para ciertas aplicaciones.

La exposición a otras formas de productos químicos o de energías, por ejemplo oxígeno, radiación ultravioleta y ataques por bacterias, también hace que el polímero se degrade o se **envejezca** lentamente, incluso a bajas temperaturas. El negro de carbono (hasta ~3%) es uno de los aditivos comúnmente empleados que ayudan a mejorar la resistencia de los plásticos contra la degradación por rayos ultravioleta.

Polímeros líquidos Los materiales termoplásticos, por lo común, no se funden a una temperatura precisa. En vez de ello, existe por lo general un margen de temperaturas en el que ocurre la fusión. Los márgenes de fusión aproximados de los polímeros comunes aparecen en la tabla 16-5. A la temperatura de fusión T_m o por encima de ésta, la unión entre las cadenas en espiral y entrelazadas es débil. Si se aplica una fuerza, las cadenas se deslizan una sobre otra y el polímero fluye sin prácticamente ninguna deformación elástica. La resistencia y el módulo de elasticidad son casi cero, y el polímero está listo para fundirse y para muchos procesos de formado. La mayor parte de los termoplásticos fundidos se adelgazan por cortante, es decir, su viscosidad aparente se reduce al incrementarse la velocidad cortante en estado estacionario.

Estados cauchóticos y correosos Por debajo de la temperatura de fusión, las cadenas de polímero siguen estando todavía retorcidas y entrelazadas. Estos polímeros tienen una estructura amorfa. Justo por debajo de la temperatura de fusión, el polímero se comporta como un *caucho*. Cuando se le aplica un esfuerzo ocurre a la vez una deformación elástica y una plástica; cuando se elimina el esfuerzo la deformación elástica se recupera con rapidez, pero el polímero queda permanentemente deformado debido al movimiento de las cadenas. Se pueden lograr grandes alargamientos permanentes, lo que permite el formado del polímero en formas útiles mediante el moldeo y la extrusión.

A temperaturas inferiores, el enlace entre cadenas es más fuerte, el polímero se vuelve más rígido y más resistente y se observa un comportamiento *correoso*. Muchos de los polímeros comerciales, incluyendo el polietileno, tienen en este estado una resistencia que se puede utilizar.

TABLA 16-5 ■ Intervalos de temperatura de fusión, de transición vítrea y de procesamiento (°C) para polímeros termoplásticos y elastómeros seleccionados

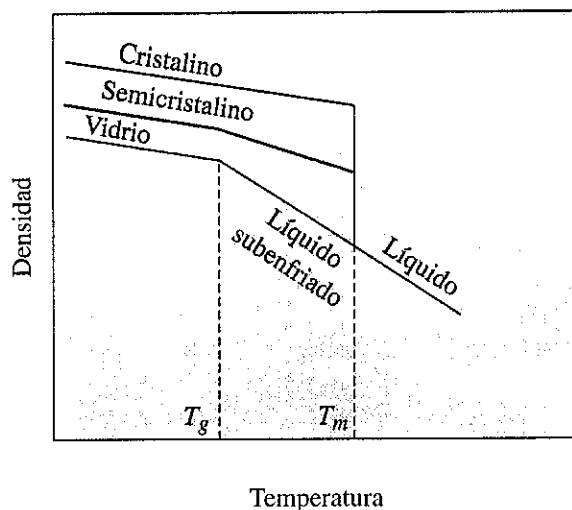
Polímero	Intervalo de temperatura de fusión	Intervalo de temperatura de transición vítrea (T_g)	Intervalo de temperatura de procesamiento
Polímeros por adición			
Poliétileno de baja densidad (LD)	98-115	-90 a -25	149-232
Poliétileno de alta densidad (HD)	130-137	-110	177-260
Cloruro de polivinilo	175-212	87	
Polipropileno	160-180	-25 a -20	190-288
Poliestireno	240	85-125	
Poliacrilonitrilo	320	107	
Politetrafluoroetileno (Teflón)	327		
Policlorotrifluoroetileno	220		
Polimetilmetacrilato (acrílico)		90-105	
Acrlonitrilo butadieno estireno (ABS)	110-125	100	177-260
Polímeros por condensación			
Acetal	181	-85	
Nylon 6,6	243-260	49	260-327
Acetato de celulosa	230		
Policarbonato	230	149	271-300
Poliéster	255	75	
Poliétileno tereftalato (PET)	212-265	66-80	227-349
Elastómeros			
Silicona		-123	
Polibutadieno	120	-90	
Policloropreno	80	-50	
Poliisopreno	30	-73	

Estado vítreo Por debajo de la temperatura de transición vítrea T_g , el polímero amorfo lineal se hace duro, frágil y como el vidrio. De nuevo, no se trata de una temperatura fija, sino de un intervalo o rango de temperaturas. Cuando el polímero se enfría por debajo de la temperatura de transición vítrea, ciertas propiedades, como la densidad o el módulo de elasticidad, cambian con diferente rapidez (figuras 16-13).

A pesar de que los polímeros vítreos tienen una mala ductilidad y formabilidad, poseen buena tenacidad, rigidez y resistencia a la termofluencia. Varios polímeros importantes, incluyendo el poliestireno y el cloruro de polivinilo, tienen temperaturas de transición vítrea por encima de la temperatura ambiente (tabla 16-5).

La temperatura de transición vítrea comúnmente es de 0.5 a 0.75 veces la temperatura de fusión absoluta T_m . Los polímeros como el polietileno, que no tienen grupos laterales complicados fijos a la cadena principal de carbono, tienen temperaturas de transición vítrea bajas, incluso por debajo de la temperatura ambiente, en comparación con los polímeros como el poliestireno, que tienen grupos laterales mucho más complicados.

Como se indicó en el capítulo 6, muchos materiales termoplásticos se vuelven frágiles a temperaturas más bajas. La fragilidad del polímero utilizado en algunos de los sellos "O" fue la que finalmente causó el desastre del *Challenger* en 1986. Las temperaturas tan bajas prevalecientes en el momento del lanzamiento causaron la fragilidad de los sellos "O" usados por los motores cohete suplementarios.

**Figura 16-13**

La relación entre la densidad y la temperatura de un polímero muestra las temperaturas de fusión y transición vítrea. Nótese que T_g y T_m no son fijas sino intervalos de temperaturas.

Observación y medición de la cristalinidad en polímeros

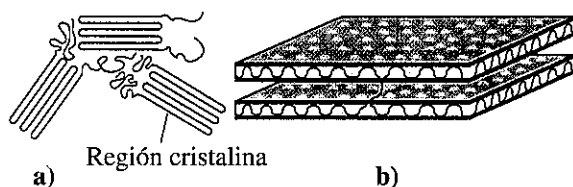
Muchos polímeros termoplásticos se cristalizan de manera parcial al ser enfriados por debajo de su temperatura de fusión, y las cadenas se acercan y se alinean estrechamente a lo largo de distancias apreciables. Conforme las cadenas en espiral y entrelazadas se reorganizan dentro del líquido formando una estructura más ordenada y compacta, se presenta un brusco incremento en la densidad (figura 16-13).

En la figura 16-14 se muestra un modelo que describe el arreglo de las cadenas en un polímero cristalino. En este modelo de *cadenas plegadas*, éstas se doblan sobre sí mismas, donde cada doblez tiene una longitud de aproximadamente 100 átomos de carbono. La cadena plegada se extiende en las tres dimensiones, produciendo placas delgadas, es decir laminillas. Los cristales pueden adoptar varias formas y es particularmente común la forma esferulítica que se muestra en la figura 16-15a). Los cristales tienen una celda unitaria que describe el empaquetamiento normal de las cadenas. La estructura cristalina para el polietileno, que se ilustra en la figura 16-15b), describe una de estas celdas. En la tabla 16-6 se detallan las estructuras cristalinas para varios polímeros. Algunos polímeros son polimórficos, es decir, tienen más de una estructura cristalina.

Incluso en los polímeros cristalinos, siempre existen regiones angostas entre las laminillas, así como entre las esferulitas, que son regiones de transición amorfa. El porcentaje en peso de la estructura que es cristalina puede calcularse partiendo de la densidad del polímero:

$$\% \text{ de cristalinidad} = \frac{\rho_c(\rho - \rho_a)}{\rho(\rho_c - \rho_a)} \times 100 \quad (16-4)$$

donde ρ es la densidad medida del polímero; ρ_a la densidad del polímero amorfo, y ρ_c la densidad del polímero completamente cristalino. De igual manera, puede utilizarse la difracción de rayos x (DRX) a fin de medir el nivel de cristalinidad y la determinación de las constantes de la estructura cristalina para polímeros monocristalinos.

**Figura 16-14**

Modelo de cadenas plegadas para la cristalinidad en los polímeros, mostrados en a) dos dimensiones y b) tres dimensiones.

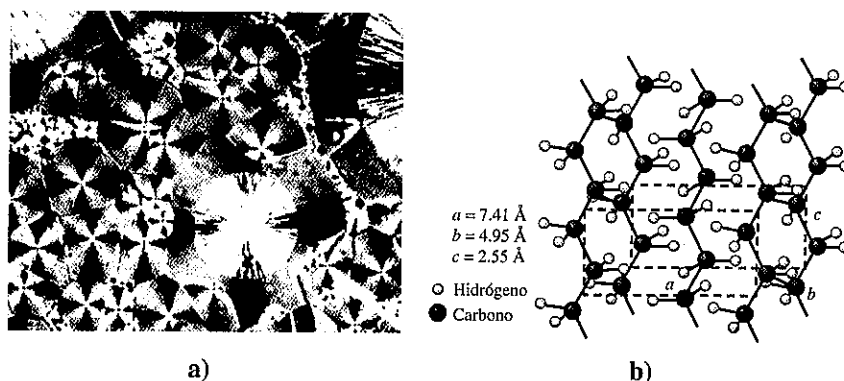


Figura 16-15 a) Fotografía de cristales esferulíticos en una matriz amorfa de nylon (200×). (Fuente: R. Brick, A. Pense y R. Gordon, Structure and Properties of Engineering Materials, 4a. ed., McGraw-Hill, 1997.) b) Celda unitaria de polietileno cristalino.

TABLA 16-6 ■ Estructuras cristalinas de varios polímeros

Polímero	Estructura cristalina	Parámetros de red (nm)
Polietileno	Ortorrómica	$a_0 = 0.741$ $b_0 = 0.495$ $c_0 = 0.255$
Polipropileno	Ortorrómica	$a_0 = 1.450$ $b_0 = 0.569$ $c_0 = 0.740$
Cloruro de polivinilo	Ortorrómica	$a_0 = 1.040$ $b_0 = 0.530$ $c_0 = 0.510$
Polisopreno (cis)	Ortorrómica	$a_0 = 1.246$ $b_0 = 0.886$ $c_0 = 0.810$

Conforme los grupos laterales se hacen más complejos, resulta más difícil cristalizar los termoplásticos. Por ejemplo, el polietileno (grupo lateral H) puede cristalizarse con mayor facilidad que el polietileno (grupo lateral anillo de benceno). El polietileno de alta densidad (HDPE) tiene un nivel superior de cristalinidad y, por tanto, una densidad más elevada (0.97 g/cm^3) que el polietileno de baja densidad (LDPE), que tiene una densidad de 0.92 g/cm^3 . La cristalinidad y, en consecuencia, la densidad del LDPE es inferior en vista de que este polímero es ramificado. Por tanto, los polímeros ramificados exhiben niveles menores de cristalinidad. Un polímero totalmente cristalino no tendría una temperatura de transición vítrea; sin embargo, las regiones amorfas en los polímeros semicristalinos sí se convierten en un material vítreo por debajo de la temperatura de transición vítrea (figura 16-13). Los polímeros como el acetal, el nylon, el HDPE y el polipropileno se conocen como cristalinos, aun cuando su nivel de cristalinidad pudiera ser moderado. Los siguientes ejemplos muestran la forma en que las propiedades de los plásticos se pueden reconocer en diferentes aplicaciones.

Ejemplo 16-6

Diseño de un material polimérico aislante

Un depósito para el almacenamiento de hidrógeno líquido se fabricará de metal, pero se desea revestir dicho metal con una capa intermedia de polímero de 3 mm de espesor entre el metal y las capas de aislamiento adicionales. La temperatura de la capa intermedia puede bajar hasta -80°C . Diseñe un material para esta capa.

SOLUCIÓN

Se desea que el material tenga una ductilidad razonable. Conforme cambia la temperatura en el depósito se presentan esfuerzos en el revestimiento, a causa de las diferencias

en la dilatación térmica, y no se desea que falle el polímero por esta razón. Se necesita un material que tenga buena ductilidad y/o que pueda soportar grandes deformaciones elásticas. Se prefiere, por tanto, un material termoplástico con una temperatura de transición vítrea inferior a -80°C o un elastómero, también con una temperatura de transición vítrea por debajo de los -80°C . De entre los polímeros de la tabla 16-2, se llega a la conclusión de que los termoplásticos como el acetal y el polietileno son satisfactorios. Entre los elastómeros apropiados, se puede incluir la silicona y el polibutadieno.

Se podría elegir quizá uno de los elastómeros, ya que éstos pueden “absorber” esfuerzos térmicos mediante deformación elástica en vez de plástica.

Ejemplo 16-7

Un nuevo tipo de polietileno flexible y resistente al impacto, para usarse como una película delgada, debe tener una densidad de entre 0.88 y 0.915 g/cm³. Diseñe el polietileno necesario para estas propiedades. La densidad del polietileno amorfo es de aproximadamente 0.87 g/cm³.

SOLUCIÓN

Para generar las propiedades y densidades deseadas, se debe controlar el porcentaje de cristalinidad del polietileno. Se puede utilizar la ecuación 16-4 para determinar la cristalinidad que corresponde al intervalo requerido de densidad; sin embargo, para ello se debe conocer la densidad del polietileno totalmente cristalino. Se pueden utilizar los datos de las tablas 16-15 y 16-16 para calcular la densidad, si se acepta que existen dos unidades de repetición de polietileno en cada celda unitaria.

$$\rho_c = \frac{(4 \text{ C})(12 \text{ g/mol}) + (8 \text{ H})(1 \text{ g/mol})}{(7.41 \times 10^{-8} \text{ cm})(4.95 \times 10^{-8} \text{ cm})(2.55 \times 10^{-8} \text{ cm})(6.022 \times 10^{23} \text{ átomos/mol})}$$

$$= 0.9942 \text{ g/cm}^3$$

Se sabe que $\rho_a = 0.87 \text{ g/cm}^3$ y que ρ varía de 0.88 a 0.915 g/cm³. La cristalinidad necesaria varía entonces desde:

$$\% \text{ cristalino} = \frac{(0.9942)(0.88 - 0.87)}{(0.88)(0.9942 - 0.87)} \times 100 = 9.1$$

$$\% \text{ cristalino} = \frac{(0.9942)(0.915 - 0.87)}{(0.915)(0.9942 - 0.87)} \times 100 = 39.4$$

Por tanto, se debe procesar el polietileno para producir un intervalo de cristalinidad de entre 9.2 y 39.4 por ciento.

16-7 Propiedades mecánicas de los termoplásticos

La mayor parte de los polímeros termoplásticos (fundidos y sólidos) exhiben un **comportamiento viscoelástico** y no newtoniano. El comportamiento es no newtoniano (es decir, el esfuerzo y la deformación no están relacionados linealmente para la mayor parte de la curva

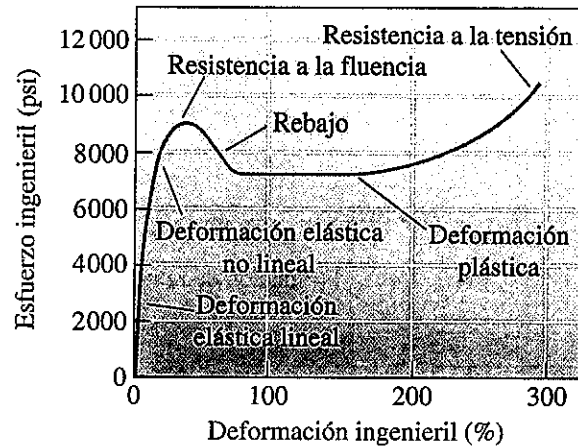


Figura 16-16
Curva ingenieril de esfuerzo-deformación para el nylon 6,6, un polímero termoplástico común.

esfuerzo-deformación). El comportamiento viscoelástico significa que cuando a un polímero termoplástico se le aplica una fuerza externa, ocurren deformaciones tanto elásticas como plásticas (viscosas). El comportamiento mecánico está íntimamente ligado a la forma en que las cadenas poliméricas se mueven bajo carga en relación con las demás. El proceso de deformación depende a la vez del tiempo y de la rapidez a la que se aplica la carga. La figura 16-16 muestra una curva esfuerzo-deformación para el nylon 6,6.

Comportamiento elástico La deformación elástica en estos polímeros termoplásticos es el resultado de dos mecanismos. Un esfuerzo aplicado hace que los enlaces covalentes de las cadenas se estiren y se distorsionen, permitiendo el alargamiento elástico de las mismas. Cuando se elimina el esfuerzo, la recuperación de esta distorsión ocurre casi instantáneamente. Este comportamiento es similar al de los metales y de los materiales cerámicos, que también se deforman elásticamente al estirar los enlaces metálicos, iónicos o covalentes. Pero, además, se pueden distorsionar segmentos completos; cuando se elimina el esfuerzo, los segmentos vuelven a sus posiciones originales sólo después de cierto tiempo, que puede ser a veces de horas o incluso de meses. Este comportamiento dependiente del tiempo, o viscoelástico, puede contribuir a algún comportamiento elástico no lineal.

Comportamiento plástico de los termoplásticos amorfos

Estos polímeros se deforman plásticamente cuando el esfuerzo es superior a la resistencia a la fluencia (límite elástico). Sin embargo, a diferencia de la deformación en el caso de los metales, la deformación plástica no es una consecuencia del movimiento de dislocaciones. En vez de lo anterior, las cadenas se estiran, giran, se deslizan y se desenmarañan bajo la acción de la carga para causar una deformación permanente. Este fenómeno puede explicar la caída en el esfuerzo más allá del punto de fluencia. Inicialmente, las cadenas pueden estar muy enmarañadas y entrelazadas. Cuando el esfuerzo es suficientemente elevado, las cadenas empiezan a desenmarañarse y enderezarse. También tiene lugar el rebajo, lo que permite el continuo deslizamiento de las cadenas con un esfuerzo menor. Sin embargo, las cadenas finalmente se arreglan de una forma casi paralela y muy cerca unas de otras; el enlace van der Waals más fuerte entre las cadenas alineadas más estrechamente requiere de esfuerzos superiores para completar el proceso de deformación y de fractura (figura 16-17). Este tipo de cristalización causado por la orientación representó un papel importante en el descubrimiento del nylon como material útil para la fabricación de fibras resistentes.

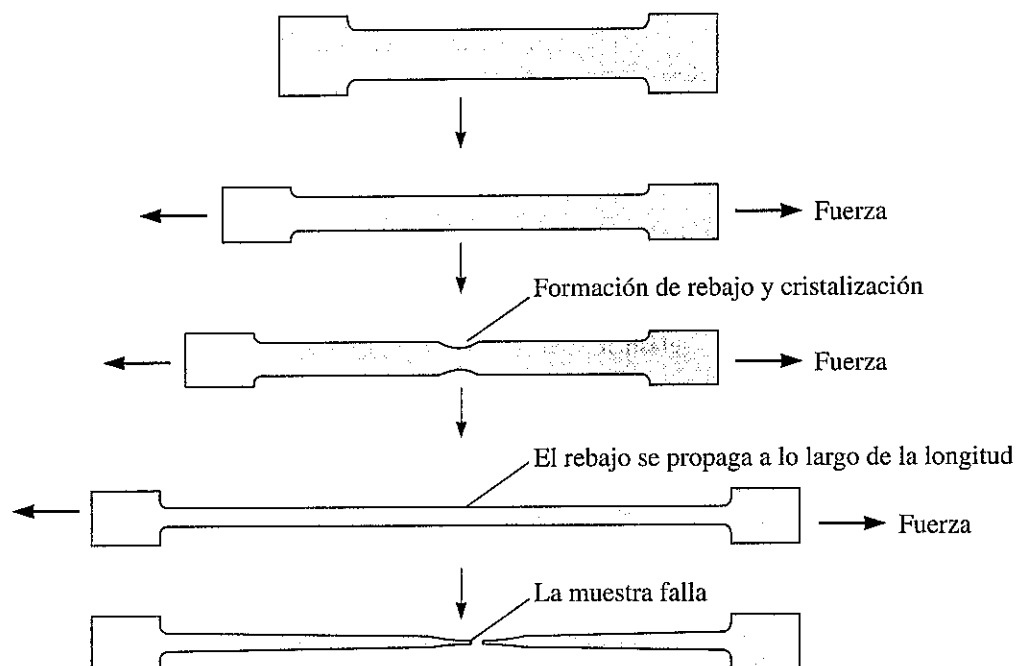


Figura 16-17 En los polímeros amorfos la formación de rebajo puede ser estable debido a que la alineación local endurece la región de sección reducida.

Ejemplo 16-8

Comparación de las propiedades mecánicas de los termoplásticos

Compare las propiedades mecánicas del polietileno de baja densidad (LD), del polietileno de alta densidad (HD), del cloruro de polivinilo, del polipropileno y del poliestireno y explique las diferencias en función de sus estructuras.

SOLUCIÓN

En seguida aparece la resistencia máxima a la tensión y el módulo de elasticidad de cada uno de los polímeros.

Polímero	Resistencia a la tensión (psi)	Módulo de elasticidad (ksi)	Estructura
Polietileno LD	3000	40	Estructura amorfa muy ramificada con monómeros simétricos
Polietileno HD	5500	180	Estructura amorfa con monómeros simétricos pero con pocas ramificaciones
Polipropileno	6000	220	Estructura amorfa con pequeños grupos laterales de metilo
Poliestireno	8000	450	Estructura amorfa con grupos laterales de benceno
Cloruro de polivinilo	9000	600	Estructura amorfa con grandes átomos de cloro como grupos laterales

Se puede concluir lo siguiente:

1. Las ramificaciones, que disminuyen la densidad y el empaquetamiento estrecho de las cadenas, reducen las propiedades mecánicas del polietileno.
2. Al añadir átomos o grupos de átomos distintos del hidrógeno a la cadena, se incrementan la resistencia y la rigidez. El grupo metilo en el polipropileno causa una cierta mejoría, el anillo de benceno del estireno da mejores propiedades y el átomo de cloro en el cloruro de polivinilo proporciona un incremento importante en las propiedades.

Fluencia lenta y relajación de esfuerzo Los polímeros termoplásticos también exhiben termofluencia (fluencia lenta), una deformación permanente que depende del tiempo ante un esfuerzo o carga constante (figuras 16-18 y 16-19).

También muestran **relajación de esfuerzo**, es decir, bajo una deformación constante el nivel de esfuerzo se reduce con el tiempo (capítulo 6). La relajación de esfuerzo, igual que la fluencia lenta, es una consecuencia del comportamiento viscoelástico del polímero. Quizá el ejemplo más familiar de este comportamiento es una banda elástica (un elastómero) estirada alrededor de varios libros. Inicialmente, la tensión en la banda es elevada, cuando la banda elástica está tensa. Después de varias semanas, la deformación en la banda elástica no ha cambiado, sigue estando alrededor de los libros pero el esfuerzo ha disminuido. De igual manera, las cuerdas de nylon en raquetas de tenis se estiran inicialmente con una tensión más elevada, ya que esta última (es decir el esfuerzo), disminuye con el transcurso del tiempo.

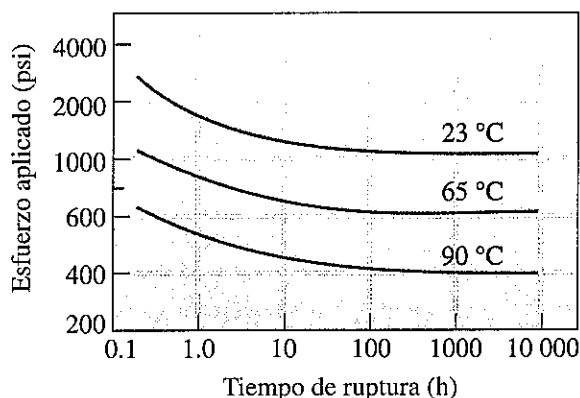


Figura 16-18
Efecto de la temperatura sobre el comportamiento esfuerzo-ruptura del polietileno de alta densidad.

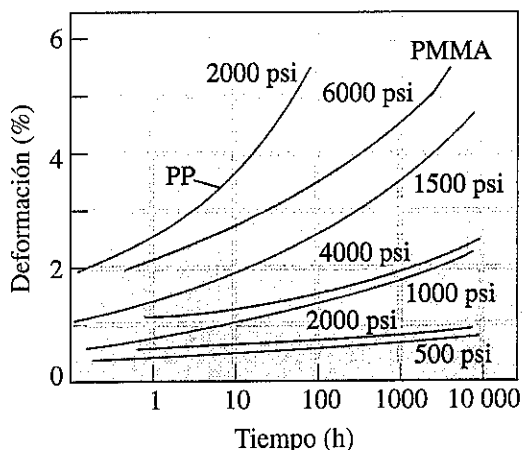


Figura 16-19
Curvas de fluencia lenta para el acrílico (PMMA) y polipropileno (PP) a 20 °C y varios esfuerzos aplicados.

En un modelo simple, la rapidez a la que ocurre la relajación de esfuerzo está relacionada con el **tiempo de relajación** λ , que se considera una propiedad del polímero (modelos más complejos utilizan una distribución de los tiempos de relajación). El esfuerzo después del tiempo t está dado por

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-t/\lambda) \quad (16-5)$$

donde λ_0 es el esfuerzo original. El *tiempo de relajación*, a su vez, depende de la viscosidad y, por tanto, de la temperatura:

$$\lambda = \lambda_0 \exp(Q/RT) \quad (16-6)$$

donde σ_0 es una constante y Q es la energía de activación relacionada con la facilidad con la que las cadenas poliméricas se deslizan entre sí. La relajación del esfuerzo ocurre con mayor *rapidez a temperaturas más elevadas* y para aquellos polímeros de baja viscosidad.

El siguiente ejemplo muestra cómo se puede tomar en cuenta la relajación del esfuerzo durante el diseño de polímeros.

Ejemplo 16-9

Una banda de poliisopreno debe mantener unido un paquete de varillas de acero durante un año. Si el esfuerzo en la banda es inferior a 1500 psi, ésta no sujetará firmemente a las varillas. Diseñe el esfuerzo inicial que debe aplicarse a una banda de poliisopreno cuando es colocada sobre el acero. Una serie de pruebas mostró que un esfuerzo inicial de 1000 psi se redujo a 980 después de seis semanas.

SOLUCIÓN

Aun cuando la deformación en la banda del elastómero puede ser constante, el esfuerzo disminuirá con el transcurso del tiempo debido a la relajación del esfuerzo. Se puede utilizar la ecuación (16-5) y las pruebas iniciales para determinar el tiempo de relajación para el polímero.

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_0 \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right) \\ 980 &= 1000 \exp\left(-\frac{6}{\lambda}\right) \\ -\frac{6}{\lambda} &= \ln\left(\frac{980}{1000}\right) = \ln(0.98) = -0.0202 \\ \lambda &= \frac{6}{0.0202} = 297 \text{ semanas} \end{aligned}$$

Ahora que se sabe cuál es el tiempo de relajación, se puede determinar el esfuerzo que debe aplicarse inicialmente a la banda a fin de que quede bajo un esfuerzo de 1500 psi después de un año (52 semanas).

$$\begin{aligned} 1500 &= \sigma_0 \exp(-52/297) = \sigma_0 \exp(-0.1751) = 0.8394\sigma_0 \\ \sigma_0 &= \frac{1500}{0.8394} = 1787 \text{ psi} \end{aligned}$$

La banda de poliisopreno debe fabricarse significativamente subdimensionada, de manera que pueda deslizarse sobre los materiales que se van a unir con una tensión de 1787 psi. Después de un año, el esfuerzo seguirá siendo de 1500 psi.

TABLA 16-7 ■ Temperaturas de deflexión para polímeros seleccionados bajo un esfuerzo de 264 psi

Polímero	Temperatura de deflexión (°C)
Poliéster	40
Polietileno (densidad ultraalta)	40
Polipropileno	60
Fenólica	80
Poliamida (nylon 6,6)	90
Poliestireno	100
Polioximetileno (acetal)	130
Poliamidaimida	280
Epoxi	290

Una medida más práctica de las propiedades de alta temperatura y de fluencia lenta de un polímero es la **temperatura de deflexión** o **temperatura de distorsión** térmica bajo carga, que es la temperatura a la que ocurre una deformación dada en una viga para una carga estándar. Una temperatura de deflexión elevada indica una buena resistencia a la fluencia lenta (termofluencia) y permite comparar varios polímeros. En la tabla 16-7, se muestran las temperaturas de deflexión para varios polímeros, que dan la temperatura requerida para causar una deflexión de 0.01 pulg de deflexión bajo un esfuerzo de 264 psi en el centro de una barra que descansa sobre puntos de apoyo separados 4 pulg. Un polímero es "a prueba de lavavajillas" si tiene una temperatura de distorsión térmica superior a ~50 °C.

Comportamiento al impacto El comportamiento viscoelástico también ayuda a comprender las propiedades al impacto de los polímeros. A rapidez de deformación muy altas, como ocurre en una prueba de impacto, no hay tiempo suficiente para que las cadenas se deslicen y causan deformación plástica. En estas circunstancias, los termoplásticos se comportan de manera frágil y tienen bajos valores al impacto. Los polímeros pueden tener una temperatura de transición. A bajas temperaturas, se observa un comportamiento frágil en una prueba de impacto mientras que a temperaturas elevadas se muestra un comportamiento más dúctil, cuando las cadenas se mueven con mayor facilidad. Estos efectos sobre la temperatura y la rapidez de deformación son similares a los que se observan en los metales, que exhiben una temperatura de transición de dúctil a frágil; no obstante, los mecanismos son distintos.

Deformación de polímeros cristalinos Varios polímeros son utilizados en el estado cristalino. Sin embargo, como se analizó antes, estos materiales nunca son totalmente cristalinos. Existen pequeñas regiones, que son regiones de transición amorfas, entre las laminillas cristalinas y entre las esferulitas cristalinas. Las cadenas poliméricas en la región cristalina se extienden hacia el interior de esas regiones amorfas como cadenas de unión. Cuando al polímero se le aplica una carga de tensión, las laminillas cristalinas dentro de las esferulitas se deslizan una por encima de la otra y empiezan a separarse conforme las cadenas de unión se estiran. Los dobleces entre laminillas se tuercen y se alinean con la dirección de la carga de tensión. Las laminillas cristalinas se rompen en trozos más pequeños y se deslizan, hasta que finalmente el polímero queda compuesto de pequeños cristales alineados unidos por cadenas de unión y orientados en forma paralela hacia la carga de tensión. Las esferulitas además cambian de forma alargándose en la dirección del esfuerzo aplicado. Bajo un esfuerzo continuado, las cadenas de unión se desenmarañan o se rompen haciendo que el polímero falle.

Microcavidades Las microcavidades ocurren cuando regiones localizadas de deformación plástica se presentan en una dirección perpendicular a la del esfuerzo aplicado.

En termoplásticos transparentes, por ejemplo los polímeros vítreos, las microcavidades producen una región translúcida u opaca que se ve como grieta. La microcavidad puede crecer hasta que se extienda por toda la sección transversal de la pieza del polímero. La microcavidad no es una grieta, y, de hecho, puede continuar para soportar un esfuerzo aplicado. El proceso es semejante al de la deformación plástica del polímero, pero el proceso puede continuar incluso en un esfuerzo pequeño durante un tiempo prolongado. La microcavidad puede llevar a una fractura frágil del polímero y con frecuencia es asistida por la presencia de un solvente (conocido como microcavidad de solvente).

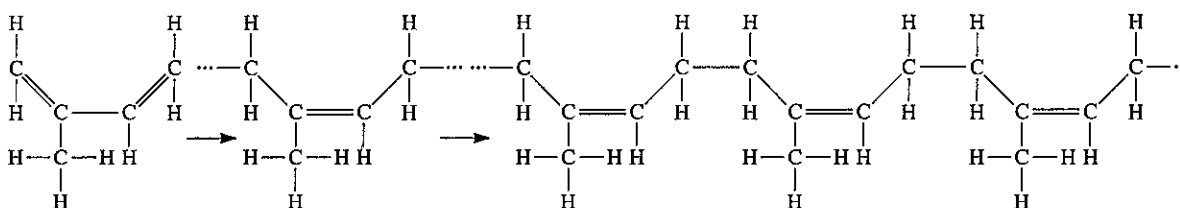
Coloreado El coloreado o blanqueado se refiere a la falla de un plástico por una cristalización localizada, que se debe a un doblado en repetidas veces que finalmente genera la formación de huecos.

16-8 Elastómeros (cauchos)

Varios polímeros naturales y sintéticos conocidos como elastómeros presentan gran cantidad de deformación elástica (>200%) al aplicarles una fuerza. Las bandas elásticas, los neumáticos de automóvil, los sellos "O", las mangueras y el aislamiento de conductores eléctricos son usos comunes para este tipo de materiales. El caucho en su estado natural, que es un elastómero, puede borrar marcas de lápices; por tanto, los elastómeros se conocen como cauchos.

Isómeros geométricos Algunos monómeros con estructuras diferentes, aunque con su misma composición, se llaman **isómeros geométricos**. Un ejemplo importante es el isopreno, es decir, el caucho natural (figura 16-20). El monómero incluye dos enlaces dobles entre átomos de carbono; este tipo de monómero se conoce como un **dieno**. La polimerización ocurre cuando se rompen los dos enlaces dobles, creando en el centro de la molécula un nuevo enlace doble y dejando sitios activos en ambos extremos.

Cis



Trans

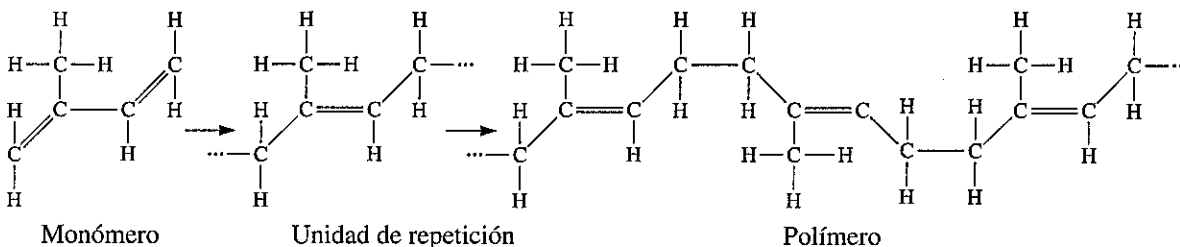


Figura 16-20 Estructuras *cis* y *trans* del isopreno. La forma *cis* es útil para la producción del elastómero isopreno.

En la forma *trans* del isopreno, el átomo de hidrógeno y el grupo metilo en el centro de la unidad de repetición se encuentran en lados opuestos del doble enlace recién formado. Esta disposición lleva a cadenas relativamente rectas; el polímero se cristaliza y forma un polímero rígido y duro que se llama *gutapercha*. Éste se utiliza para manufacturar pelotas de golf y suelas para zapatos.

Sin embargo, en la forma *cis*, el átomo de hidrógeno y el grupo metilo se encuentran del mismo lado del enlace doble. Esta diferente geometría hace que las cadenas del polímero se desarrollen en una estructura muy enrollada, dificultando una gran compactación y generando un polímero de caucho amorfo. Si al *cis*-isopreno se le aplica un esfuerzo, el polímero se comporta de una forma viscoelástica. Las cadenas se desenrollan y los enlaces se estiran, produciendo una deformación elástica, aunque también las cadenas se deslizan entre sí, produciendo una deformación plástica que no se recupera. El polímero se comporta como termoplástico en vez de como elastómero.

Enlaces cruzados Se puede evitar la deformación plástica viscosa y, al mismo tiempo, conservar una gran deformación elástica mediante el **enlace cruzado** de las cadenas (figura 16-21). La **vulcanización**, que utiliza átomos de azufre, es un método común de formar enlaces cruzados. La figura 16-22 muestra la forma en que hileras de átomos de azufre pueden enlazar las cadenas poliméricas, conforme este último se procesa y conforma a temperaturas de aproximadamente 120 a 180 °C. Los pasos de enlazamiento cruzado pueden incluir el reacomodo de un átomo de hidrógeno y el reemplazo de uno o más de los enlaces dobles con sencillos. El proceso de enlazamiento cruzado no es reversible y, en consecuencia, este elastómero no es fácilmente reciclable.

La curva de esfuerzo-deformación para un elastómero aparece en la figura 16-23. Prácticamente toda la curva representa deformación elástica; por tanto, los elastómeros muestran un comportamiento elástico no lineal. Al principio, el módulo de elasticidad se reduce debido al desenrollado de las cadenas. Sin embargo, una vez extendidas las cadenas, cualquier deformación elástica adicional sucede gracias al estiramiento de los enlaces, lo que genera un módulo de elasticidad más elevado.

El número de enlaces cruzados (o la cantidad de azufre que se ha agregado al material) determina la elasticidad del caucho. Las adiciones de azufre bajas dejan al caucho blando y flexible, por ejemplo en las bandas elásticas o en los guantes de caucho. Al incrementar el contenido de azufre, se restringe el desenrollado de las cadenas y el caucho se hace más duro,

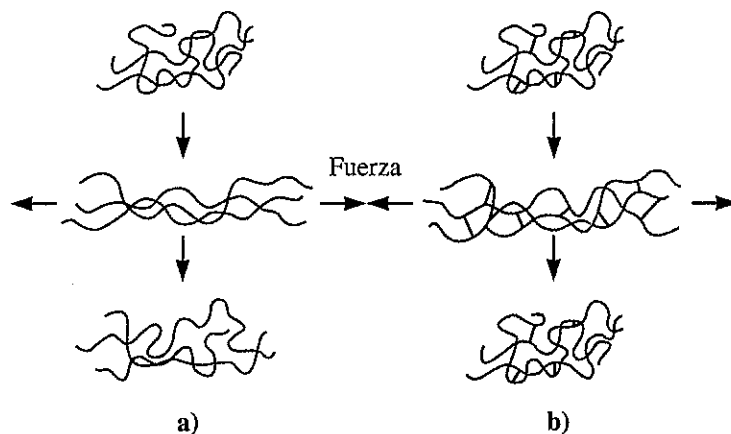
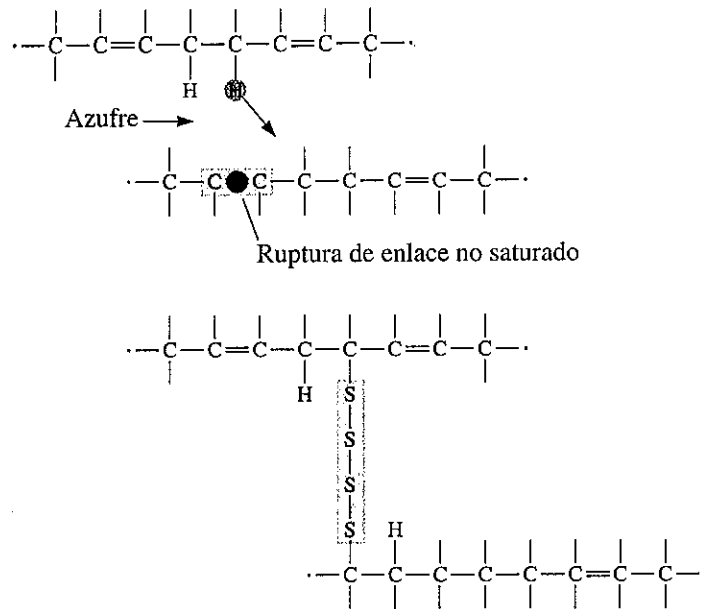
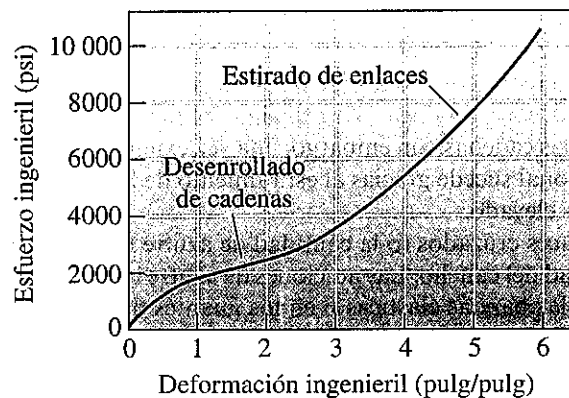


Figura 16-21 a) Cuando el elastómero no contiene enlaces cruzados, la aplicación de una fuerza causa deformación elástica y plástica; una vez eliminada la carga, el elastómero queda deformado en forma permanente. b) Cuando existen enlaces cruzados, el elastómero quizá pueda sufrir una gran deformación elástica pero, al eliminarse la carga, éste vuelve a su forma original.

**Figura 16-22**

Enlaces cruzados de las cadenas de poliisopreno, que pueden presentarse al introducir hileras (cadenas cortas) de átomos de azufre. Los sitios de fijación del azufre se presentan al reacomodarse o al perderse un átomo de hidrógeno y por la ruptura de un enlace no saturado.

**Figura 16-23**

Curva de esfuerzo-deformación de un elastómero. Prácticamente toda la deformación es elástica, por lo cual el módulo de elasticidad varía conforme cambia la deformación.

más rígido y frágil, como en el caucho utilizado en los soportes de motores. Comúnmente, se agrega de 0.5 a 5% de azufre para obtener el enlace cruzado en los elastómeros. En años recientes, también se han desarrollado y utilizado muchos más sistemas de *vulcanización eficiente* (VE) que no tienen azufre.

Elastómeros comunes Los elastómeros, que son polímeros amorfos, no se cristalizan con facilidad durante su proceso; tienen una temperatura de transición vítrea baja y las cadenas pueden deformarse elásticamente con facilidad al aplicárseles una fuerza. Los elastómeros de uso común (tablas 16-8 y 16-9) cumplen con estos requisitos. El poliisopreno es un caucho natural. El policloropreno, es decir Neopreno, es un material común para mangueras y aislamientos eléctricos. Muchos de los elastómeros sintéticos de importancia son copolímeros. El polibutadieno (caucho butadieno o Buna-S) es similar al poliisopreno, pero la unidad de repetición tiene cuatro átomos consistentes en un enlace doble. Se trata de un

Polímero	Unidad de repetición	Aplicaciones
Poliisopreno	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H} \text{---} \text{C} \text{---} \text{H} \text{H} \text{H} \\ \quad \quad \\ \cdots \text{---} \text{C} \text{---} \text{C} = \text{C} \text{---} \text{C} \text{---} \cdots \\ \quad \quad \\ \text{H} \quad \quad \text{H} \end{array}$	Neumáticos, pelotas de golf, suelas de zapatos
Poliisobutadieno (o caucho butadieno o Buna-S)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \quad \text{H} \\ \quad \quad \\ \cdots \text{---} \text{C} \text{---} \text{C} = \text{C} \text{---} \text{C} \text{---} \cdots \\ \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	Neumáticos industriales, endurecimiento de otros elastómeros, cámaras para neumáticos, tiras para impermeabilizar, mangueras para vapor
Poliisobutileno (o caucho butilo)	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H} \text{H} \text{---} \text{C} \text{---} \text{H} \\ \quad \\ \cdots \text{---} \text{C} \text{---} \text{C} \text{---} \cdots \\ \quad \\ \text{H} \text{H} \text{---} \text{C} \text{---} \text{H} \\ \\ \text{H} \end{array}$	
Policloropreno (Neopreno)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{Cl} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \quad \\ \cdots \text{---} \text{C} \text{---} \text{C} = \text{C} \text{---} \text{C} \text{---} \cdots \\ \quad \quad \\ \text{H} \quad \quad \text{H} \end{array}$	Mangueras, recubrimiento de cables
Butadieno-estireno (caucho BS o BSR)	$\cdots \left[\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \quad \\ \text{---} \text{C} \text{---} \text{C} = \text{C} \text{---} \text{C} \text{---} \\ \quad \quad \\ \text{H} \quad \quad \text{H} \end{array} \right]_n \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{---} \text{C} \text{---} \text{C} \text{---} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} \cdots$	Neumáticos
Butadieno-acrilonitrilo (Buna-N)	$\cdots \left[\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \quad \\ \text{---} \text{C} \text{---} \text{C} = \text{C} \text{---} \text{C} \text{---} \\ \quad \quad \\ \text{H} \quad \quad \text{H} \end{array} \right]_n \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{---} \text{C} \text{---} \text{C} \text{---} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{C} \equiv \text{N} \end{array} \cdots$	Juntas, mangueras para combustible
Siliconas	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H} \text{---} \text{C} \text{---} \text{H} \\ \\ \cdots \text{---} \text{O} \text{---} \text{Si} \text{---} \cdots \\ \\ \text{H} \text{---} \text{C} \text{---} \text{H} \\ \\ \text{H} \end{array}$	Juntas, sellos

caucho de costo relativamente bajo, pero su resistencia a los solventes no es buena. Como resultado, se utiliza como material endurecedor para fabricar otros elastómeros. El caucho butadieno-estireno (BSR o BS), que también es uno de los componentes del ABS (figura 16-10), se usa para neumáticos de automóvil. El caucho de butilo, es decir el poliisobutadieno, se utiliza en la fabricación de cámaras para neumáticos, soportes contra la vibración y como

TABLA 16-9  Propiedades de elastómeros seleccionados

	Resistencia a la tensión (psi)	% de alargamiento	Densidad (g/cm ³)
Poliisopreno	3000	800	0.93
Polibutadieno	3500		0.94
Poliisobutileno	4000	350	0.92
Policloropreno (neopreno)	3500	800	1.24
Butadieno-estireno	3000	2000	1.0
Butadieno-acrilonitrilo	700	400	1.0
Siliconas	1000	700	1.5
Elastómeros termoplásticos	5000	1300	1.06

material de recubrimiento contra la intemperie. Las siliconas son otro elastómero importante basado en cadenas formadas por átomos de silicio y de oxígeno. James Wright, de la General Electric, inventó el Silly Putty[®], el cual se hace utilizando siloxano de polidimetil terminado en hidroxilo, óxido bórico y algunos otros adhesivos. A una rapidez de deformación reducida, se puede estirar significativamente pero se romperá en cuanto se tire de él con rapidez. Los cauchos de silicona (también conocidos como polisiloxanos) resisten temperaturas altas, lo que permite el uso del elastómero a temperaturas de hasta 315 °C. Las siliconas de bajo peso molecular forman líquidos y se conocen como aceites de silicio. Las siliconas también se pueden adquirir como un sistema de dos partes que se puede moldear y curar. La goma de mascar contiene una base hecha de caucho natural, de butadieno-estireno, o acetato de polivinilo (APV).

Elastómeros termoplásticos [ETP] Éste es un grupo especial de polímeros que no se basan en enlaces cruzados para producir una gran cantidad de deformación elástica. La figura 16-24 muestra la estructura de un copolímero de bloque de estireno-butadieno tratado de manera que las unidades de repetición de estireno se localizan únicamente en los extremos de las cadenas. Aproximadamente 25% de la cadena está formado por estireno. Los extremos de estireno de varias cadenas forman dominios de forma esférica. El estireno tiene una temperatura de transición vítrea elevada; en consecuencia, los dominios son resistentes y rígidos y mantienen unidas las cadenas. Las áreas de caucho que contienen unidades de repetición butadieno se localizan entre los dominios del estireno; estas partes del polímero tienen una temperatura de transición vítrea por debajo de la temperatura ambiente y, por tanto, son de comportamiento blando y acauchado. La deformación elástica se presenta mediante un movimiento recuperable de las cadenas; se evita el deslizamiento de éstas a bajas temperaturas, gracias a los dominios del estireno.

Los copolímeros de bloque estireno-butadieno difieren del caucho BS visto líneas antes, en que no son necesarios los enlaces cruzados de los monómeros de butadieno y, de hecho, son indeseables. Cuando se calienta el elastómero termoplástico, el estireno se calienta por encima de la temperatura de transición vítrea, se destruyen los dominios y el polímero se deforma viscosamente; esto es, se comporta como cualquier otro termoplástico, facilitando mucho su fabricación. Cuando el polímero se enfría, se vuelven a formar los dominios y el polímero vuelve a sus características de elastómero. En consecuencia, los elastómeros termoplásticos se comportan como termoplásticos normales a temperaturas elevadas, y como elastómeros, a bajas temperaturas. Este comportamiento también permite que los elastómeros termoplásticos se reciclen con mayor facilidad que los convencionales. El Viton[™] es un fluoroelastómero útil para entornos de altas temperaturas y corrosivos. Se utiliza para juntas, sellos "O" y otras aplicaciones.

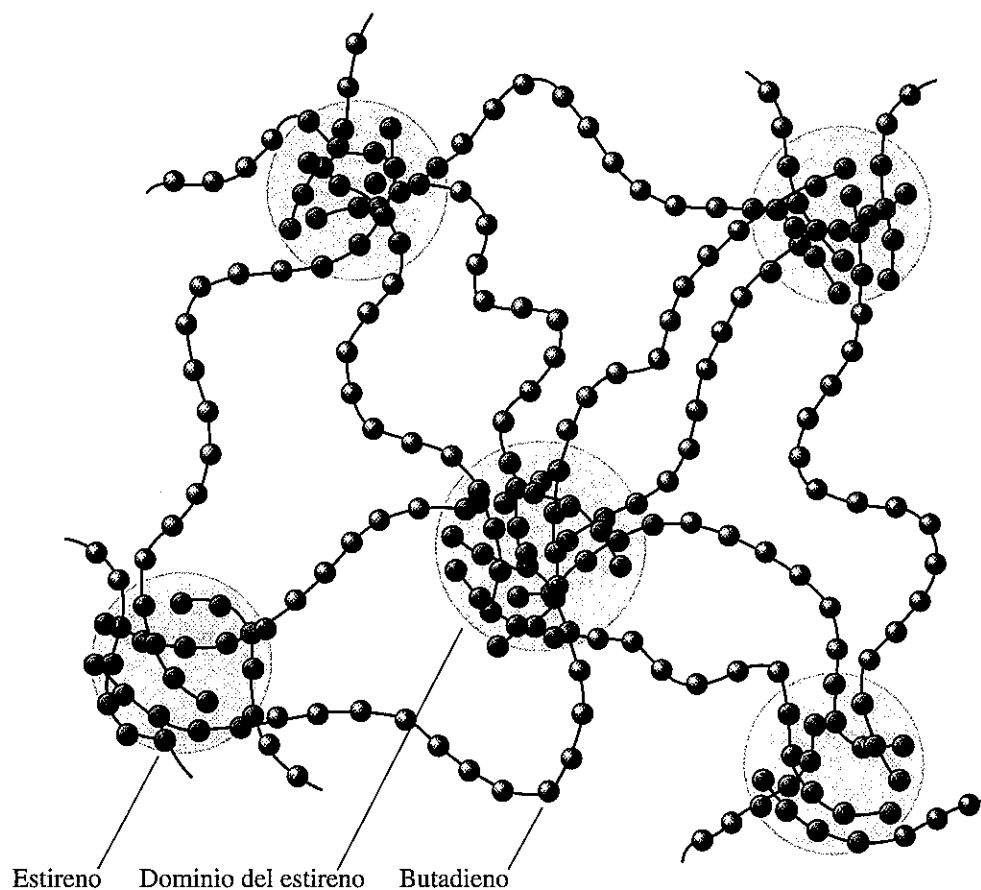


Figura 16-24 Estructura del copolímero estireno-butadieno en un elastómero termoplástico. La naturaleza vítrea de los dominios del estireno le da un comportamiento elástico sin los enlaces cruzados del butadieno.

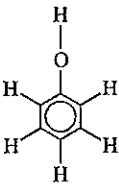
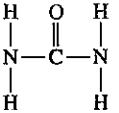
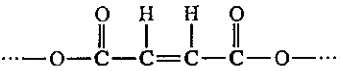
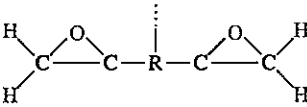
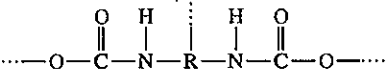
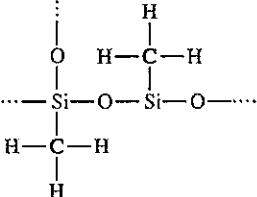
16-9 Polímeros termoestables o termofijos

Los polímeros termoestables, conocidos también como termofijos, están formados por cadenas de polímeros con una gran cantidad de enlaces cruzados que forman la estructura de red tridimensional. En vista de que las cadenas no pueden girar ni deslizarse, estos polímeros poseen buena resistencia, rigidez y dureza, pero también tienen malas propiedades de ductilidad e impacto, así como una temperatura de transición vítrea elevada. En un ensayo a la tensión, los polímeros termoestables presentan el mismo comportamiento que un metal o material cerámico frágil.

Los polímeros termoestables suelen iniciarse como cadenas lineales. Dependiendo del tipo de unidad de repetición y del grado de polimerización, el polímero inicial puede ser una resina sólida o líquida; en algunos casos, se utiliza una resina líquida de dos o tres partes (como en el caso de los dos tubos de pegamento epóxico que se utiliza con frecuencia). El calor, la presión, la mezcla de varias resinas y otros métodos inician el proceso de enlaces cruzados. Los enlaces cruzados no son reversibles; una vez formados, los termoestables no pueden reutilizarse o reciclarse convenientemente.

Los grupos funcionales para varios polímeros termoestables comunes aparecen resumidos en la tabla 16-10, y en la tabla 16-11 se dan las propiedades representativas. Un grupo funcional es una distribución definida de átomos con un conjunto particular de propiedades.

TABLA 16-10 ■ Unidades funcionales y aplicaciones de termoestables seleccionados

Polímero	Unidades funcionales	Aplicaciones comunes
Fenólicos		Adhesivos, recubrimientos, laminados
Aminas		Adhesivos, utensilios de cocina, piezas eléctricas moldeadas
Poliésteres		Piezas eléctricas moldeadas, laminados decorativos, matrices poliméricas en la fibra de vidrio
Epóxicos		Adhesivos, piezas eléctricas moldeadas, matriz para materiales compuestos
Uretanos		Fibras, recubrimientos, espumas, aislantes
Silicones		Adhesivos, juntas, selladores

Fenólicos Los fenólicos, que son los termoestables fenólicos de más uso, se utilizan con frecuencia como adhesivos, recubrimientos, laminados y componentes moldeados para aplicaciones eléctricas o de motores.

La Baquelita™ es uno de los termoestables fenólicos más comunes. Una reacción de condensación que une las moléculas de fenol y de formaldehído produce la resina fenólica lineal inicial. Este proceso continúa hasta que se forma una cadena lineal de fenol-formalde-

TABLA 16-11 ■ Propiedades de polímeros termoestables comunes

	Resistencia a la tensión (psi)	% de alargamiento	Módulo elástico (ksi)	Densidad (g/cm ³)
Fenólicos	9000	2	1300	1.27
Aminas	10 000	1	1600	1.50
Poliésteres	13 000	3	650	1.28
Epóxicos	15 000	6	500	1.25
Uretanos	10 000	6		1.30
Silicones	4000	0	1200	1.55

hído; no obstante, el fenol es trifuncional. Después de formada la cadena, existe un tercer sitio en cada anillo de fenol para el enlace cruzado con cadenas adyacentes.

Aminas Las amino-resinas, que se producen al combinar monómeros de urea o de melanina con el formaldehído, se parecen a los fenólicos. Los monómeros se unen mediante un enlace formaldehído para producir cadenas lineales. El formaldehído excedente proporciona los enlaces cruzados requeridos para producir polímeros resistentes y rígidos, adecuados para adhesivos, laminados, materiales moldeados para utensilios de cocina y equipo eléctrico, como cortacircuitos, interruptores y placas para contactos y de pared.

Uretanos Dependiendo del grado de entrecruzamiento de los enlaces, los uretanos se comportan como polímeros termoestables, como termoplásticos o como elastómeros. Estos polímeros encuentran aplicaciones, como fibras, recubrimientos y espumas para muebles, colchones y aislamientos.

Poliésteres Los poliésteres forman cadenas de moléculas de ácidos y de alcohol mediante una reacción de condensación, y dan agua como subproducto. Cuando estas cadenas contienen enlaces no saturados, una molécula de estireno puede servir para proporcionar el enlace cruzado. Los poliésteres se utilizan como materiales para moldeo en una diversidad de aplicaciones eléctricas, laminados decorativos, lanchas y otros equipos marinos y como matriz para materiales compuestos, como la fibra de vidrio.

Epóxicos Los epóxicos son polímeros termoestables formados a partir de moléculas que tienen un anillo cerrado C-O-C. Durante la polimerización, los anillos C-O-C se abren y los enlaces se reorganizan para unir las moléculas. El más común de los epóxicos comerciales está basado en el bisfenol A, al cual se le han añadido dos unidades epóxido. Estas moléculas se polimerizan para producir cadenas y después se les hace reaccionar con agentes aceleradores del curado, para proporcionar los enlaces cruzados. Los epóxicos se utilizan como adhesivos, piezas moldeadas rígidas para aplicaciones eléctricas, componentes de automotores, tableros de circuitos, artículos deportivos y como matriz para materiales compuestos reforzados de fibra de alto rendimiento para uso aeroespacial.

Poliimidas Las poliimidas presentan una estructura en anillo que contiene un átomo de nitrógeno. Un grupo especial, las bismaleimidas (BMI), es importante en la industria aeronaval y aeroespacial. Pueden operar de manera continua a temperaturas de 175 °C y no se desintegran hasta alcanzar los 460 °C.

Interpenetración en redes de polímeros Algunos materiales poliméricos especiales se pueden producir cuando las cadenas termoplásticas se entrelazan a través de una estructura termoestable, formando **interpenetración en redes de polímeros**. Por ejemplo, las cadenas de nylon, acetal y polipropileno pueden penetrar en un termoestable de silicona con enlaces cruzados. En sistemas más avanzados se pueden producir dos estructuras termoestables interpenetrantes.

16-10 Adhesivos

Los adhesivos son polímeros que se utilizan para unir otros polímeros, metales, materiales cerámicos, materiales compuestos o combinaciones de los anteriores. Los adhesivos se utilizan en una diversidad de aplicaciones; los de uso más extenso son los "adhesivos estructurales", que se utilizan en la industria automotriz, aeroespacial, en aparatos domésticos, en la electrónica, la construcción y en artículos deportivos.

Adhesivos químicamente reactivos Estos adhesivos incluyen a poliuretanos, epóxicos, fenólicos, anaeróbicos y poliimidas. Los sistemas de un solo componente están constituidos por una sola resina polimérica, que se cura por exposición a la humedad, al calor o, en el caso de los anaeróbicos, por la ausencia de oxígeno. Los sistemas de dos componentes, como los epóxicos, se curan al combinarse dos resinas.

Adhesivos por evaporación o por difusión El adhesivo se disuelve en un solvente orgánico o en agua, y se aplica a las superficies que deben unirse. Al evaporarse el portador, el polímero restante crea la unión. Los adhesivos a base de agua tienen preferencia, tanto desde el punto de vista de consideraciones ambientales como de seguridad. El polímero puede estar totalmente disuelto en el agua o consistir en un látex, una dispersión estable de polímero en el agua. Es común utilizar una amplia variedad de elastómeros, vinilos y acrílicos.

Adhesivos de fusión por calor Estos termoplásticos y elastómeros termoplásticos se funden si se calientan. Al enfriarse, el polímero se solidifica uniendo los materiales. Las temperaturas de fusión de estos adhesivos son de aproximadamente 80 a 110 °C, lo que limita el uso de estos adhesivos a temperaturas elevadas. Los adhesivos de fusión por calor de alto rendimiento, como las poliamidas y los poliésteres, pueden utilizarse hasta los 200 °C.

Adhesivos sensibles a la presión Estos adhesivos son principalmente elastómeros o copolímeros de elastómero producidos en forma de película o de recubrimientos. Se requiere presión para que el polímero se adhiera al sustrato. Se utilizan para producir cintas eléctricas y de empaque, etiquetas, losetas para piso, recubrimientos para muros y laminados texturizados imitación madera. Los adhesivos removibles sensibles a la presión se emplean para aplicaciones médicas tales como el vendaje y administración de un medicamento intramuscular.

Adhesivos conductores Un adhesivo polimérico puede contener un material de relleno, por ejemplo escamas o polvo de plata, de cobre o de aluminio para obtener conductividad eléctrica y térmica. En algunos casos, se desea una buena conductividad térmica, pero no eléctrica. Para lograr esta combinación de propiedades, pueden utilizarse materiales de relleno, como la alúmina, el nitruro de boro y la sílice.

16-11 Procesamiento y reciclaje de polímeros

Existen varios métodos para producir formas de polímeros, incluyendo el moldeo, la extrusión y la manufactura de películas o de fibras. Las técnicas utilizadas para conformar polímeros dependen en gran medida de la naturaleza del polímero mismo, en particular si se trata de un termoplástico o de un termoestable. En la conformación de los polímeros termoplásticos, se utilizan casi todas las técnicas. El polímero se calienta hasta cerca de la temperatura de fusión, o por encima de ésta, a fin de que se torne ahulado o líquido; entonces se conforma en un molde o en una matriz para darle la forma requerida. Los elastómeros termoplásticos se pueden formar con el mismo procedimiento. En estos procesos, se puede reciclar el desecho con facilidad y se minimiza el desperdicio. En los polímeros termoestables se utilizan menos técnicas de conformado, dado que, una vez que se presentan los enlaces cruzados, los polímeros termoestables ya no se pueden conformar. Los elastómeros se procesan en equipo de mezclado que promueva la acción cortante de los agentes, como el Banbury. Se agregan negro de carbono y otros aditivos. El calentamiento debido a la deformación viscoelástica puede iniciar en forma prematura los enlaces cruzados de material. Después del paso de mezclado, se le agrega un agente de curado como el óxido de zinc. El material que se descarga del mezclador es plegable y se procesa utilizando un dado de extrusión corto, se moldea utilizando un molino de dos rodillos o se aplica sobre piezas mediante recubrimiento por inmersión. Este procesamiento de los elastómeros se conoce como **mezcla de caucho** o **compounding**.

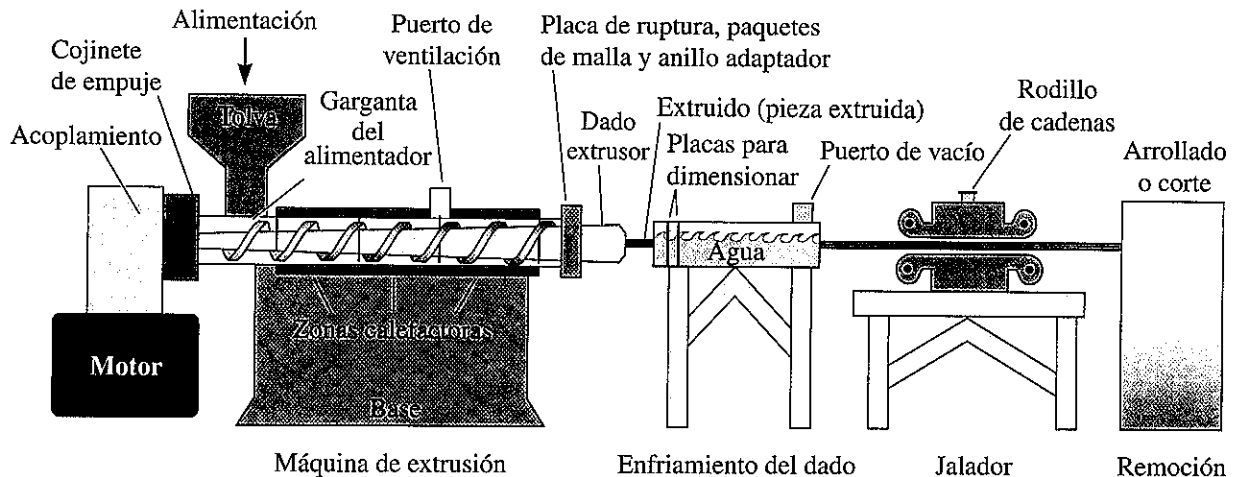


Figura 16-25 Esquema de una máquina de extrusión utilizada para el procesamiento de polímeros. (Adaptado de *Plastics: Materials and Processing*, 2a. ed., por A. Brent Strong, p. 382, fig. 11-1. Derechos de autor © 2000 Prentice Hall. Adaptado con permiso de Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, NJ.)

Las siguientes son algunas de las técnicas que se utilizan principalmente para el procesamiento y moldeo de los polímeros; se podrá observar que casi todas estas técnicas son aplicables sólo a polímeros termoplásticos.

Extrusión Ésta es la técnica más usada para el procesamiento de termoplásticos. La extrusión puede tener dos finalidades. Primero, es una manera de conformar ciertas figuras de manera continua (figura 16-25). En segundo término, al procesar polímeros que posteriormente utilizarán otros procesos, la extrusión proporciona un mezclador excelente para los aditivos, por ejemplo negro de carbono, rellenos, etc. Un mecanismo de tornillo formado de un par de tornillos (extrusión mediante tornillos múltiples) obliga a pasar el termoplástico caliente, ya sea sólido o líquido, así como los aditivos, por la abertura de un dado de extrusión para producir formas sólidas, películas, hojas, tubos, tuberías (figura 16-25). Una máquina de extrusión puede medir de 60 a 70 pies de largo y 2 pies de diámetro e incluir varias zonas de enfriamiento y calentamiento diferentes. En vista de que los polímeros termoplásticos presentan un comportamiento de adelgazamiento por cortante y son viscoelásticos, en la extrusión de los polímeros resulta determinante el control tanto de la temperatura como de la viscosidad. En la figura 16-26 se muestra un proceso especial de extrusión para la producción de películas. La extrusión también se puede utilizar para recubrir alambres y cables, ya sea con polímeros termoplásticos o elastómeros.

Moldeo por soplado Una preforma hueca de termoplástico, conocida como **parisón**, se introduce en un molde utilizando presión de gas y se expande contra las paredes del molde (figura 16-27). Este proceso se utiliza para la producción de botellas, recipientes, depósitos de combustible para automóviles y otras formas huecas de plástico.

Moldeo por inyección Los polímeros termoplásticos calentados por encima de la temperatura de fusión, mediante una máquina de extrusión, son forzados a entrar en una matriz cerrada para producir una pieza; este proceso es similar a la fundición o inyección a presión de metales. Un émbolo o algún mecanismo especial de tornillo aplican presión para obligar al polímero caliente a entrar en la matriz. De esta manera se produce una amplia diversidad de productos, desde tazas, peines y engranes hasta botes para la basura.

Termoformado Las hojas de polímero termoplástico, calentadas hasta la región plástica, pueden conformarse sobre un molde para producir productos tan diversos como empaques para huevo y paneles decorativos. El conformado puede efectuarse utilizando matrices, vacío o presión de aire.

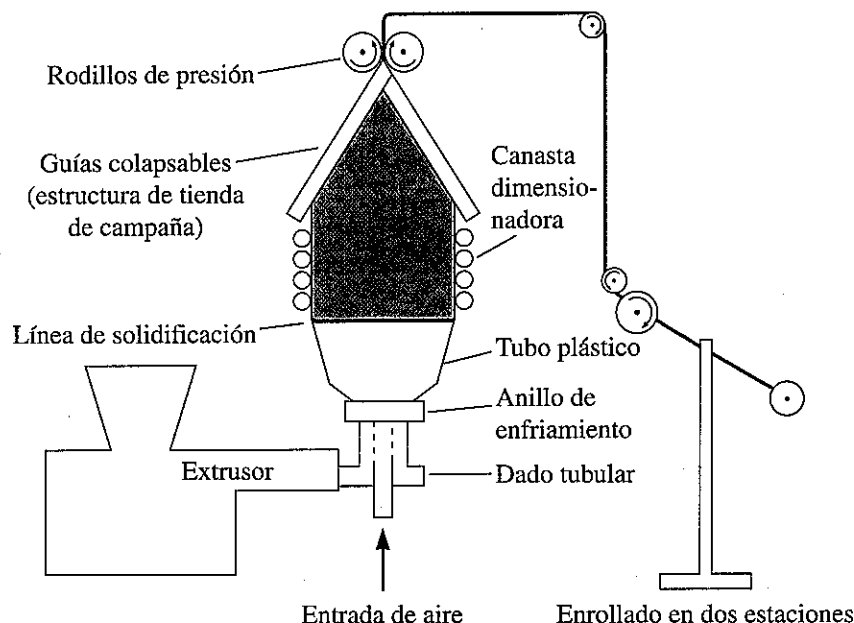


Figura 16-26 Técnica mediante la cual se pueden producir películas poliméricas (utilizadas, por ejemplo, en la manufactura de bolsas para basura). La película es extruida en forma de una bolsa, y se mantiene separada mediante presión de aire hasta que el polímero se enfría. (Adaptada de *Plastics: Materials and Processing*, 2a. ed., por A. Brent Strong, p. 397, fig. 11-8. Derechos de autor © 2000 Prentice Hall. Adaptada con permiso de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.)

Calandrado En una calandria se vierte plástico fundido en un juego de rodillos que tienen entre sí una pequeña abertura. Los rodillos, que pueden estar realzados con algún dibujo, presionan el material formando una hoja delgada de polímero que con frecuencia es de cloruro de polivinilo. Con este método se fabrican comúnmente losetas para piso y cortinas para regadera.

Hilado Mediante el hilado es posible producir filamentos, fibras e hilos. Se hace pasar el polímero termoplástico por un dado que tiene gran cantidad de pequeñas perforaciones. El dado, conocido como **hilador**, puede girar y producir un hilo trenzado. En el caso de algunos materiales, incluyendo el nylon, el hilo puede ser estirado posteriormente con la finalidad de alinear las cadenas de polímero paralelamente al eje del hilo; este proceso aumenta la resistencia de las fibras.

Colado Muchos polímeros se pueden vaciar en moldes y permitir que solidifiquen. Los moldes pueden ser placas de vidrio para producir láminas individuales de plástico, o bandas de acero inoxidable en movimiento para el colado continuo de hojas más delgadas. Un proceso especial de colado es el *moldeo centrífugo*, en el que el plástico fundido se vierte en un molde que gira sobre dos ejes. La fuerza centrífuga empuja al polímero contra las paredes del molde, produciendo una forma delgada, por ejemplo el techo de un vehículo recreativo.

Moldeo por compresión Las piezas moldeadas termoestables se conforman con frecuencia mediante la colocación del material sólido en una matriz caliente, antes de presentarse el enlace cruzado. La aplicación de una alta presión a elevada temperatura hace que el polímero se funda, llene la matriz y de inmediato empiece a endurecerse. Mediante este proceso, pueden producirse pequeños receptáculos eléctricos así como salpicaderas, cofres y paneles laterales de automóviles (figura 16-28).

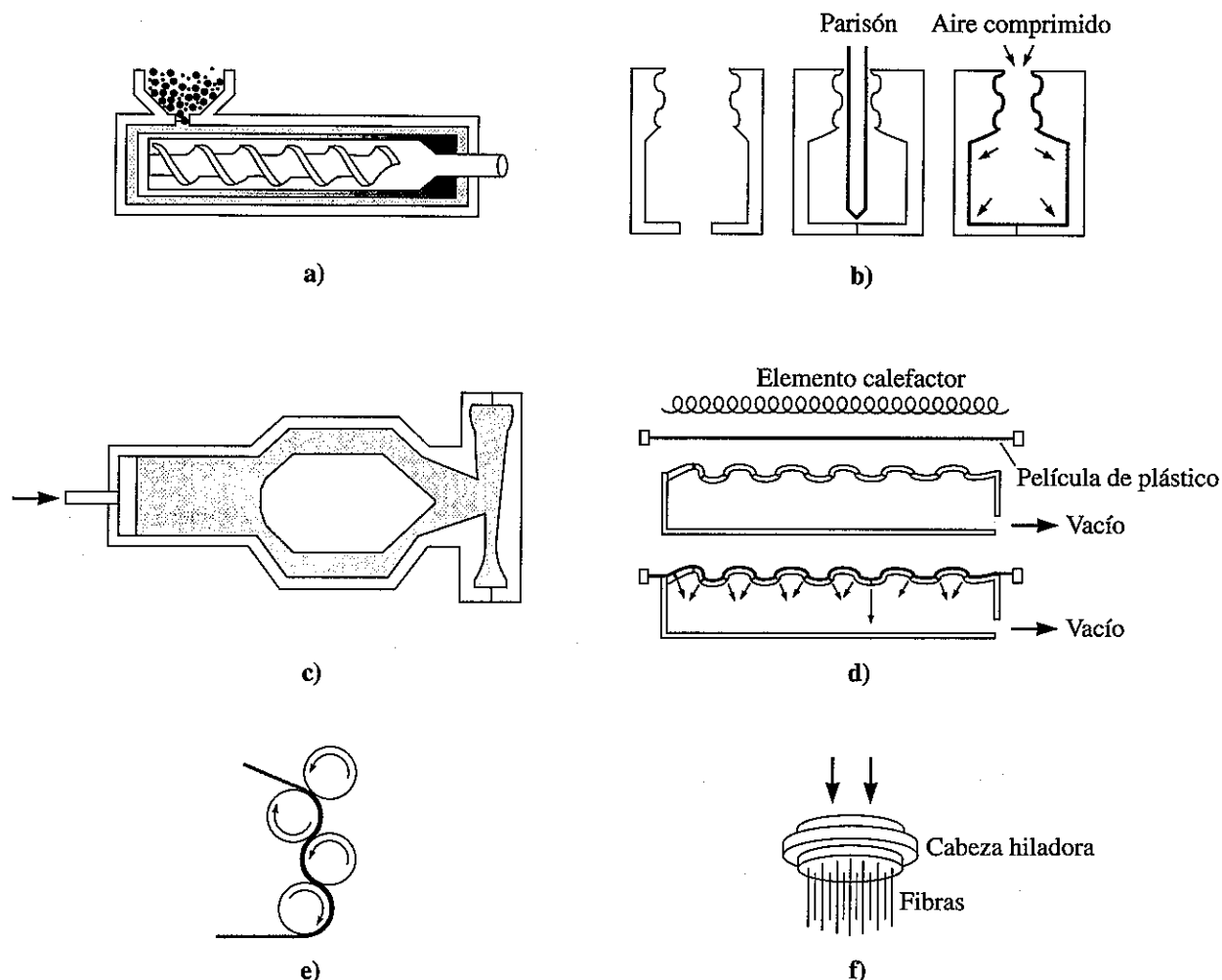


Figura 16-27 Procesos comunes de formado de polímeros termoplásticos: a) extrusión, b) moldeo por soplado, c) moldeo por inyección (no se muestra el barril de extrusión), d) termoformado, e) el calandrado y f) hilado.

Moldeo por transferencia Se utiliza en este moldeo una doble cámara para la transferencia de polímeros termoestables. El polímero se calienta bajo presión en una de las cámaras. Después de fundirse, se inyecta en la cavidad del dado anexo. Este proceso permite obtener algunas de las ventajas del moldeo por inyección para los polímeros termoestables (figura 16-28).

Moldeo de inyección por reacción [MIR] Los polímeros termoestables en forma de resina se inyectan primero en un mezclador y de ahí en forma directa a un molde caliente para obtener una figura. En el molde ocurren simultáneamente tanto el conformado como el fraguado. En el moldeo de inyección por reacción reforzada (MIRR), un material de refuerzo formado por partículas o por fibras cortas se introduce en la cavidad del molde, y se impregna de resinas líquidas para producir un material compuesto. Mediante este proceso se fabrican defensas y salpicaderas para automóviles, así como piezas para muebles.

Espumas Es posible fabricar productos en forma de espumas con poliestireno, uretanos, polimetilmetacrilato y otros polímeros. El polímero se fabrica en pequeñas esferas que

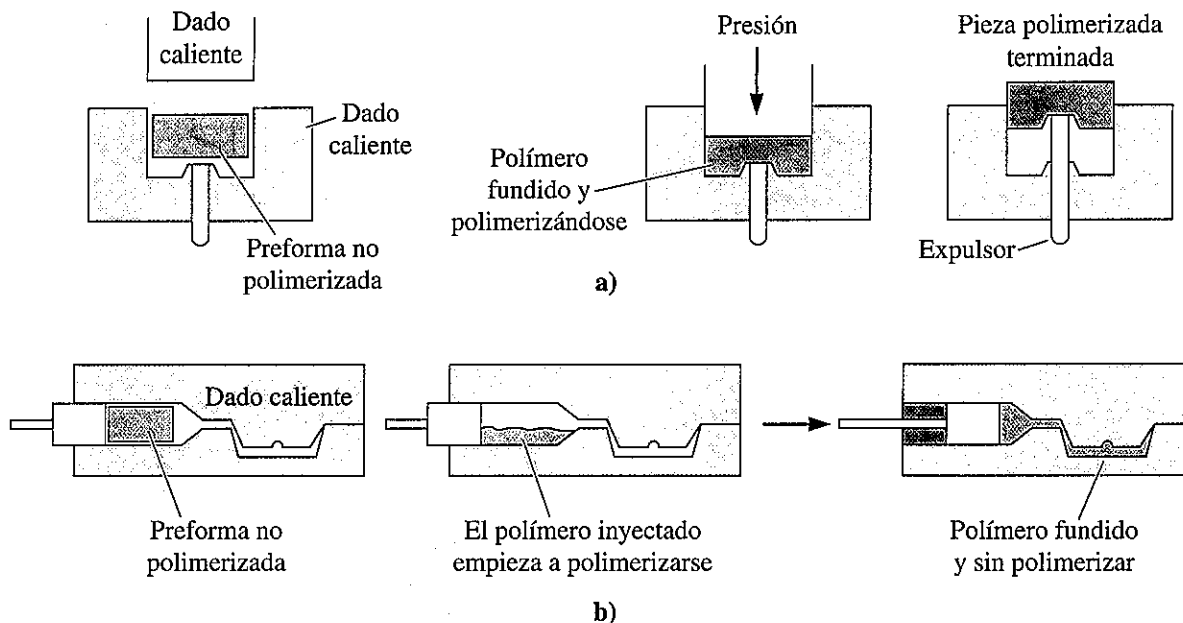


Figura 16-28 Procesos comunes de formado para polímeros termoestables: a) moldeo por compresión y b) moldeo por transferencia.

contienen un agente espumante, por ejemplo el pentano. Durante el proceso de preexpansión, las esferas aumentan su diámetro hasta en 50 veces. Las esferas preexpandidas se inyectan entonces en un dado, donde se funden mediante vapor para generar productos excepcionalmente ligeros, con densidades de quizá sólo 0.02 g/cm^3 . Los vasos de poliestireno expandido (PE), material de empaque y material de aislamiento son algunas de las aplicaciones para las espumas. Los bloques de motor para muchos automóviles se hacen utilizando un molde hecho de esferas expandidas de poliestireno.

Ejemplo 16-10

Paneles aislantes para un domo de coque

Se desea diseñar un material que se pueda utilizar para la fabricación de paneles aislantes de aproximadamente 4 pies de ancho por 8 de alto. El material debe proporcionar un buen aislamiento térmico. ¿Qué material seleccionaría usted?

SOLUCIÓN

Los vidrios tienden a ser buenos aisladores del calor; sin embargo, son pesados, más costosos y frágiles. Los polímeros son ligeros, de fabricación económica y pueden ser buenos aislantes térmicos. Se puede utilizar espuma de poliestireno, ya que el aire incluido en los poros aumenta de manera significativa su eficiencia como aislantes térmicos. Para obtener mejores propiedades mecánicas, se podrían producir espumas con una densidad relativamente alta (en comparación con las espumas utilizadas para hacer los vasos desechables para café). Finalmente, desde un punto de vista de seguridad, hay que cerciorarse de que se agreguen a dichas espumas algunos retardadores de flamas y fuego. Estos paneles se hacen utilizando cuentas expandidas de poliestireno que contienen pentano. Para ello se utiliza un proceso de moldeo. Las láminas pueden cortarse en los tamaños requeridos utilizando un alambre de metal caliente.

Reciclado de plásticos El reciclado es de gran importancia; un análisis completo de todo el proceso queda fuera del alcance de este libro, pero tiene un papel preponderante en nuestra vida diaria. Los materiales se reciclan de muchas maneras; por ejemplo, una parte del polímero que resulta de un desecho proveniente de un proceso de manufactura (conocido como remolido) se utiliza en las plantas de reciclaje. El reciclaje de los materiales termoplásticos es relativamente sencillo y de práctica común. Obsérvese que muchos de los productos plásticos se encuentran en todas partes (bolsas, botellas de refresco, recipientes para yogur, etc.) tienen un número estampado sobre su superficie. Para los productos PET (símbolo del reciclaje "PETE", a causa de problemas de marcas registradas), el número es el 1. Para el HDPE, vinilo (símbolo de reciclaje V), LDPE, PP y PS los números son 2, 3, 4, 5 y 6, respectivamente. Otros plásticos se identifican con el número 7.

Los plásticos termoestables y los elastómeros son más difíciles de reciclar, aunque todavía se pueden usar. Por ejemplo, los neumáticos pueden desmenuzarse y utilizarse para preparar pisos de patios de recreo o carreteras más seguras.

A pesar de los enormes esfuerzos para el reciclaje, gran parte de los terrenos con rellenos sanitarios contienen plásticos (los más abundantes son los desperdicios de papel). En vista de la característica limitada de los recursos petrolíferos, de la amenaza del calentamiento global y de la necesidad de llegar a tener un entorno más limpio y más seguro, es importante hacer un uso cuidadoso y procurar el reciclaje de todo tipo de materiales.

Resumen

- Los polímeros se elaboran a partir de grandes moléculas que se producen uniendo moléculas de menor tamaño llamadas monómeros, mediante reacciones de polimerización por adición o por condensación. Los *plásticos* son materiales basados en compuestos poliméricos y contienen además muchos otros aditivos que mejoran sus propiedades. En comparación con la mayor parte de los metales y materiales cerámicos, los plásticos tienen resistencia y rigidez bajas y temperatura de fusión también baja; también presentan densidad baja y una buena resistencia química. Los plásticos se utilizan en una gran diversidad de tecnologías.
- Los materiales termoplásticos tienen cadenas que no están químicamente unidas entre sí, lo que permite que el material pueda ser fácilmente conformado en figuras útiles, que tenga una buena ductilidad y que pueda ser reciclado de manera económica. Los termoplásticos pueden tener una estructura amorfa, lo que le da una baja resistencia y una buena ductilidad cuando la temperatura ambiente es superior a la temperatura de transición vítrea. Los polímeros son más rígidos y frágiles cuando la temperatura se reduce por debajo de la temperatura de transición vítrea. Muchos termoplásticos también pueden cristalizarse en forma parcial, ya sea durante el enfriamiento o por la aplicación de un esfuerzo. Esto aumenta su resistencia.
- Las cadenas termoplásticas pueden convertirse en más rígidas y resistentes utilizando monómeros no simétricos que incrementan la resistencia de la unión entre cadenas y dificultan que éstas se desenmarañen al aplicárseles un esfuerzo. Además, muchos monómeros producen cadenas rígidas que contienen átomos o grupos de átomos distintos del carbono; esta estructura también produce termoplásticos de alta resistencia.
- Los elastómeros son materiales termoplásticos o materiales termoestables con enlaces cruzados débiles que exhiben una deformación elástica superior a 200%. Mediante la vulcanización, se producen enlaces cruzados en las cadenas. Estos enlaces cruzados hacen posible la obtención de deformaciones elásticas muy grandes sin deformación permanente. Si se incrementa el número de enlaces cruzados, aumenta la rigidez y se reduce la deformación elástica de estos materiales.
- Los elastómeros termoplásticos combinan características tanto de materiales termoplásticos como de elastómeros. A temperaturas elevadas, estos polímeros se comportan como materiales termoplásticos y se les puede conformar plásticamente; a bajas temperaturas, se comportan como elastómeros.

- Los polímeros termoestables tienen múltiples enlaces cruzados en una estructura de red tridimensional. Comúnmente, se encuentra que tienen temperaturas de transición vítrea elevadas, buena resistencia y comportamiento frágil. Una vez completados los enlaces cruzados, estos polímeros ya no pueden reciclarse con facilidad.
- Los procesos de manufactura dependen del comportamiento de los polímeros. Los procesos como la extrusión, el moldeo por inyección, el termoformado, el moldeo por vaciado, el calandrado y el hilado son posibles gracias al comportamiento viscoelástico de los materiales termoplásticos. El comportamiento no reversible de las uniones en los polímeros termoestables limita su procesamiento a un número menor de técnicas, por ejemplo el moldeo por compresión, moldeo por transferencia y moldeo por inyección por reacción.

Glosario

Aramidas Polímeros poliamidas que contienen grupos de átomos aromáticos en la cadena lineal.

Coloreado (blanqueado) Al doblar repetidamente un termoplástico, se genera la cristalización de pequeños volúmenes de material; ello crea huecos que al final causan la falla del mismo.

Comportamiento viscoelástico Deformación de un material por deformación elástica y flujo viscoso cuando se aplica un esfuerzo.

Copolímero Polímero por adición producido al unir más de un tipo de monómero.

Cristalización inducida por esfuerzo Proceso de formar cristales mediante la aplicación de un esfuerzo externo. Por lo general, una parte importante de numerosos plásticos amorfos se puede cristalizar en esta forma, haciéndolos así más fuertes.

Dieno Grupo de monómeros que tienen enlaces covalentes dobles. Estos monómeros se utilizan con frecuencia en la producción de elastómeros.

Elastómeros Polímeros (termoplásticos o termoestables con pocos enlaces cruzados) que tienen una deformación elástica $>200\%$.

Elastómeros termoplásticos Polímeros que se comportan como materiales termoplásticos a altas temperaturas, pero como elastómeros a temperaturas bajas.

Enlace no saturado Enlace covalente doble, o incluso triple, que une a los átomos en una molécula orgánica. Cuando un solo enlace covalente reemplaza el enlace no saturado, puede ocurrir la polimerización.

Enlaces cruzados Unión de cadenas poliméricas entre sí para la producción de un polímero de red tridimensional.

Envejecimiento Degradación lenta de polímeros como resultado de una exposición a niveles bajos de calor, oxígeno, bacterias o rayos ultravioleta.

Grado de polimerización Peso molecular promedio de un polímero dividido entre el peso molecular del monómero.

Hiladora Dado de extrusión con muchas perforaciones pequeñas por las que se obliga a pasar un polímero caliente o fundido, para producir filamentos. La rotación de la hiladora retuerce los filamentos formando un hilo.

Interpenetración en redes de polímeros Estructuras poliméricas producidas al entrelazar dos estructuras o redes poliméricas diferentes.

Isómero geométrico Molécula que tiene la misma composición, pero no la misma estructura, que otra molécula.

Mero Grupo unitario de átomos y de moléculas que definen un arreglo característico para un polímero. El polímero puede definirse como un material formado a partir de la combinación de varios meros o unidades.

Mezcla de caucho (compounding) Procesamiento de elastómeros en un aparato conocido como mezclador Banbury y seguido por conformación mediante extrusión, moldeo o recubrimiento por inmersión.

Microcavidad Deformación plástica localizada en un polímero. Una microcavidad puede generar la formación de grietas en el material.

Monómero Molécula a partir de la cual se produce el polímero.

Oligómero Molécula de bajo peso molecular que contiene dos meros (dímeros) o tres meros (trímeros).

Parísón Trozo caliente de polímero blando o fundido que es soplado o conformado en una forma útil.

Plástico Material predominantemente polimérico que incluye otros aditivos.

Polimerización por adición Proceso mediante el cual se forman cadenas de polímeros al juntar monómeros sin crear un subproducto.

Polimerización por condensación Mecanismo de polimerización en el que se condensa una molécula pequeña (por ejemplo agua, metanol, etc.) como subproducto.

Polímero Los polímeros son materiales fabricados por moléculas gigantes (o macrocelulares) en forma de cadena con pesos moleculares promedio de 10 000 a más de 1 000 000 g/mol, formados a partir de la unión de muchos meros o unidades mediante enlaces químicos. Los polímeros, por lo general, aunque no siempre, se basan en el carbono.

Polímero lineal Cualquier polímero en el que las moléculas estén colocadas en forma de cadenas parecidas a espaguetis.

Polímero ramificado Cualquier polímero formado por cadenas que a su vez están organizadas como una cadena principal, así como cadenas secundarias que se ramifican partiendo de la primera.

Polímeros cristalinos líquidos Cadenas poliméricas excepcionalmente rígidas que actúan como varillas rígidas, incluso por encima de temperaturas altas.

Polímeros termoestables Polímeros con muchos enlaces cruzados para producir una estructura de red tridimensional resistente.

Relajación de esfuerzos Reducción del esfuerzo que actúa sobre un material a lo largo de un periodo con la deformación constante debida a deformación viscoelástica.

Tacticidad Describe la localización en la cadena de átomos o de grupos de átomos del polímero en monómeros no simétricos.

Temperatura de deflexión Temperatura a la cual un polímero se deformará cierta cantidad bajo una carga estándar (también llamada temperatura de *distorsión*).

Temperatura de degradación Temperatura por arriba de la cual un polímero se quema, se carboniza o se desintegra.

Temperatura de transición vítrea [T_g] Intervalo de temperatura por debajo del cual el polímero amorfo adopta una estructura vítrea rígida.

Termoplásticos Polímeros lineales o ramificados en los cuales las cadenas de moléculas no están entrelazadas.

Tiempo de relajación Propiedad de un polímero relacionada con la velocidad a la cual ocurre la relajación del esfuerzo.

Unidad de repetición Unidad estructural que se repite para elaborar un polímero. También se conoce como *mero*.

Vulcanización Cadenas de elastómeros con enlaces cruzados mediante la introducción de azufre u otros productos químicos.

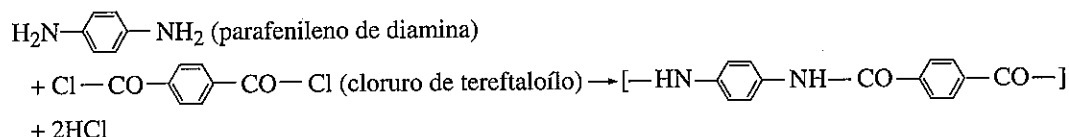
Problemas

Sección 16-1 Clasificación de polímeros

- 16-1** ¿Qué son los polímeros lineales y los ramificados? ¿Los termoplásticos pueden ser ramificados?
- 16-2** Defina a) un plástico termoplástico, b) un plástico termoestable, c) elastómeros y d) elastómeros termoplásticos.
- 16-3** ¿En qué aplicaciones eléctricas y ópticas se usan polímeros? Explique dando ejemplos.
- 16-4** ¿Cuáles son las ventajas principales de los plásticos en comparación con los materiales cerámicos, los vidrios y materiales metálicos?

Sección 16-2 Polimerización por adición y condensación

- 16-5** ¿Qué significan los términos polimerización por condensación, polimerización por adición, iniciador y terminador?
- 16-6** El Kevlar ($C_{14}H_{10}N_2O_2$) se emplea en diversas aplicaciones desde neumáticos a blindajes para carrocerías por su elevada relación entre resistencia y peso. El polímero se produce a partir de los monómeros de parafenileno de diamina ($C_6H_8N_2$) y cloruro de tereftaloilo ($C_8H_4Cl_2O_2$) por medio de la siguiente reacción:



- ¿Qué tipo de polimerización representa la reacción de líneas antes?
- Suponiendo 100% de eficiencia, calcule el peso del cloruro de tereftaloilo necesario para combinarse por completo con 1 kg de parafenileno de diamina.
- ¿Cuánto Kevlar se produce?

Sección 16-3 Grado de polimerización

Sección 16-4 Termoplásticos comunes

- 16-7** Explique por qué el polietileno de baja densidad es bueno para manufacturar bolsas para el supermercado y, sin embargo, debe usarse el polietileno de peso molecular super-elevado donde se requiera de resistencia y de una muy elevada resistencia al desgaste.
- 16-8** Calcule el número de cadenas en un tubo de PVC de 5 metros de largo, con diámetro interior de 5 cm y un grosor de 0.5 cm, si el grado de polimerización es de 1000. Suponga que las cadenas son de igual longitud. La densidad del PVC es de 1.4 g/cm³. La unidad de repetición del PVC se ilustra en la tabla 16-3.
- 16-9** El peso molecular del polimetilmetacrilato (véase la tabla 16-3) es de 250 000 g/mol. Si todas las cadenas poliméricas tienen una misma longitud,
- calcule el grado de polimerización y
 - el número de cadenas en 1 g del polímero.
- 16-10** El grado de polimerización del politetrafluoroetileno (véase la tabla 16-3) es de 7500. Si todas las cadenas de polímeros tienen la misma longitud, calcule
- el peso molecular de las cadenas y
 - el número total de cadenas en 1000 g del polímero.
- 16-11** Una cuerda de polietileno pesa 0.25 lb por pie. Si cada cadena contiene 7000 unidades de repetición,
- calcule el número de cadenas de polietileno en un tramo de 10 pies de cuerda y
 - la longitud total de cadenas dentro de la cuerda, suponiendo que los átomos de carbono en cada cadena están separados aproximadamente 0.15 nm y la longitud de una unidad de repetición es de 0.24495 nm.

- 16-12** El análisis de una muestra de poliacrilonitrilo (véase la tabla 16-3) muestra que existen seis longitudes de cadenas, con la siguiente cantidad de cadenas para cada longitud. Determine

- el peso molecular promedio en peso y el grado de polimerización y
- el peso molecular promedio por números y el grado de polimerización.

Número de cadenas	Peso molecular medio de las cadenas (g/mol)
10 000	3000
18 000	6000
17 000	9000
15 000	12 000
9000	15 000
4000	18 000

Sección 16-5 Relaciones estructura-propiedades en termoplásticos

Sección 16-6 Efecto de la temperatura en termoplásticos

Sección 16-7 Propiedades mecánicas de los termoplásticos

- 16-13** Explique el significado de los siguientes términos: temperatura de descomposición, temperatura de distorsión térmica, temperatura de transición vítrea y temperatura de fusión. ¿Cuál es la razón por la cual los termoplásticos no tienen una temperatura de fusión o de transición vítrea fija?
- 16-14** Usando la tabla 16-5, trace la relación entre las temperaturas de transición vítrea y las temperaturas de fusión de los termoplásticos por adición. ¿Cuál es la relación aproximada entre estas dos temperaturas críticas? ¿Los termoplásticos por condensación y los elastómeros siguen también la misma relación?

- 16-15** Elabore una lista de los polímeros por adición de la tabla 16-5, que pudieran resultar buenos candidatos para hacer la ménsula que sujeta el espejo retrovisor en el exterior de un automóvil, suponiendo que las temperaturas bajan con frecuencia por debajo de 0 °C. Justifique sus selecciones.
- 16-16** Con base en la tabla 16-5, ¿cuál de los elastómeros podría ser el adecuado para una junta en una bomba para CO₂ líquido a -78 °C? Explique.
- 16-17** ¿Cómo se comparan las temperaturas de transición vítrea del polietileno, polipropileno y polimetilmetacrilato? Explique sus diferencias con base en la estructura del monómero.
- 16-18** ¿Cuáles de los polímeros por adición de la tabla 16-5 se utilizan en su estado correoso a la temperatura ambiente? ¿Cómo debe esperarse que afecte este estado sus propiedades mecánicas en comparación con aquellas de los polímeros vítreos?
- 16-19** ¿Cuáles son los factores que afectan la cristalinidad de los polímeros? Explique el desarrollo y el papel de la cristalinidad en el PET y en el nylon.
- 16-20** Describa las tendencias relativas a cristalizar que tienen los siguientes polímeros. Explique su respuesta.
- Polietileno ramificado en comparación con polietileno lineal.
 - Polietileno comparado con el copolímero de polietileno-polipropileno.
 - Polipropileno isotáctico comparado con polipropileno atáctico.
 - Polimetilmetacrilato comparado con el acetal (polioximetileno).
- 16-21** La densidad cristalina del polipropileno es de 0.946 g/cm³, y su densidad amorfa es de 0.855 g/cm³. ¿Cuál es el porcentaje en peso de la estructura que es cristalina en un polipropileno que tiene una densidad de 0.9 g/cm³?
- 16-22** Si la rapidez de deformación en un polímero puede ser representada por

$$d\varepsilon/dt = \sigma/\eta + (1/E) d\sigma/dt$$

donde ε = deformación, σ = esfuerzo, η = viscosidad, E = módulo de elasticidad y t = tiempo, deduzca la ecuación 16-5, suponiendo deformación constante (es decir, $d\varepsilon = 0$). ¿De qué es función el tiempo de relajación (λ) en la ecuación 16-5?

- 16-23** Un componente polímero, que necesita mantener un nivel de esfuerzo arriba de 10 MPa para el correcto funcionamiento de un conjunto, está programado para ser sustituido cada dos años como mantenimiento preventivo. Si el esfuerzo inicial era de 18 MPa y bajó a 15 MPa después de un año de operación (suponiendo deformación constante), ¿evitará una falla la pieza de repuesto bajo el programa preventivo especificado?
- 16-24** Explique el significado de estos términos: termofluencia (fluencia lenta), relajación de esfuerzos, microcavidades, coloreado en polímeros, agrietamiento por esfuerzo causado por el entorno y envejecimiento de los polímeros.
- 16-25** A un sujetador hecho de un polímero usado en un ensamble complejo se le aplica un esfuerzo de 2500 psi. A una deformación constante, el esfuerzo se reduce a 2400 psi después de 100 horas. Si para que la pieza funcione correctamente es necesario que el esfuerzo se mantenga por arriba de 2100 psi, determine la vida del ensamble.
- 16-26** A un polímero que opera bajo una deformación constante se le aplica un esfuerzo de 1000 psi; después de seis meses, el esfuerzo baja a 850 psi. Para una aplicación específica, una pieza fabricada a partir del mismo polímero debe conservar un esfuerzo de 900 psi después de transcurrir 12 meses. ¿Cuál debería ser, para esta aplicación, el esfuerzo original que debe aplicársele?
- 16-27** En la figura 16-18 aparecen los datos para el tiempo de ruptura del polietileno. A un esfuerzo aplicado de 600 psi, la figura indica que el polímero se rompe en 0.2 h a 90 °C, pero a 65 °C resiste 10 000 horas. Suponiendo

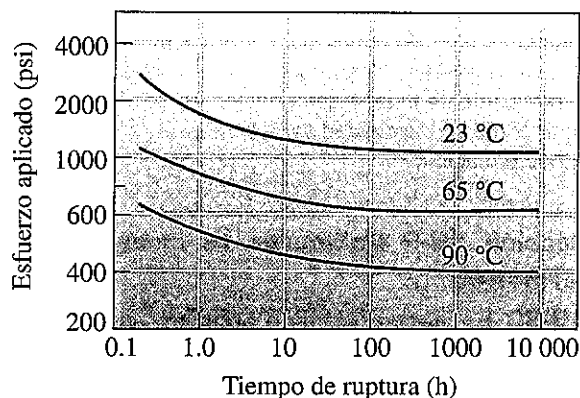


Figura 16-18 (Repetida para el problema 16-27.) Efecto de la temperatura en el comportamiento de esfuerzo-ruptura de polietileno de alta densidad.

que el tiempo de ruptura está relacionado con la viscosidad, calcule la energía de activación para la viscosidad del polietileno y estime el tiempo de ruptura a 23 °C.

Sección 16-8 Elastómeros (cauchos)

16-28 El polímero ABS se puede elaborar con diferentes cantidades de monómeros de estireno, butadieno y acrilonitrilo, mismos que están presentes en forma de dos copolímeros: caucho BS y SAN.

- ¿Cómo se ajustaría la composición del ABS si se desea obtener buenas propiedades al impacto?
- ¿Cómo se ajustaría la composición si se desea obtener buena ductilidad a la temperatura ambiente?
- ¿Cómo se ajustaría la composición si se desea obtener buena resistencia a la temperatura ambiente?

16-29 La figura 16-23 muestra la curva esfuerzo-deformación de un elastómero. A partir de la curva, calcule y trace el módulo de elasticidad en función de la deformación y explique los resultados.

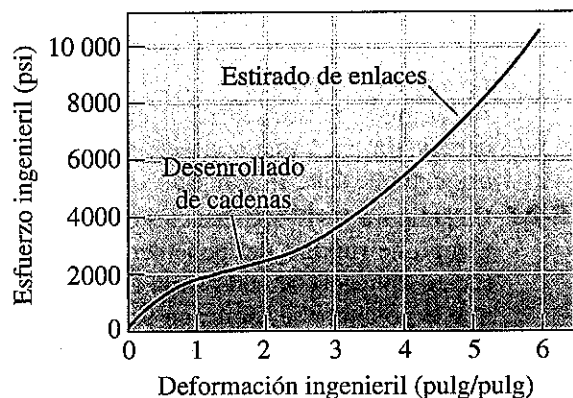


Figura 16-23 (Repetida para el problema 16-29.) Curva de esfuerzo-deformación para un elastómero. Prácticamente toda la deformación es elástica; el módulo de elasticidad varía conforme cambia la deformación.

Sección 16-9 Polímeros termoestables o termofijos

16-30 Explique el término polímero termoestable. ¿Por qué no se puede producir un polímero termoestable utilizando sólo ácido adípico y etilenglicol?

16-31 Explique por qué no se utiliza normalmente el grado de polimerización para definir los polímeros termoestables?

16-32 Defienda o contradiga la elección de los siguientes materiales como adhesivos fundidos en caliente para una aplicación en la que la pieza ensamblada estará sujeta a una carga tipo impacto:

- polietileno;
- poliestireno;
- elastómero termoplástico estireno-butadieno;
- poliacrilonitrilo, y
- polibutadieno.

16-33 Compare y contraste las propiedades de los materiales termoplásticos, termoestables y los elastómeros.

Problemas de diseño

16-34 La figura 16-29 muestra el comportamiento del polipropileno, polietileno y el acetal a dos temperaturas diferentes. Se desea producir una varilla de 12 pulg de largo, de un polímero que funcionará a 40 °C durante seis meses bajo una carga constante de 500 libras. Diseñe un material, así como el diámetro de la varilla, de modo que no ocurra más de 5% de alargamiento por termofluencia (fluencia lenta).

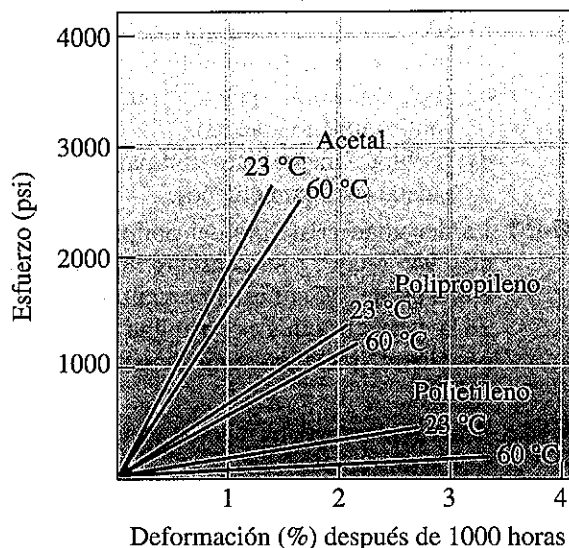


Figura 16-29 Efecto del esfuerzo aplicado sobre el porcentaje de deformación por termofluencia para tres polímeros (para el problema 16-34).

- 16-35** Diseñe un material polimérico que pueda usarse para producir un engrane de 3 pulg de diámetro, a utilizarse para transferir energía de un motor de baja potencia. ¿Cuáles son los requisitos de diseño? ¿Qué clase de polímeros (termoplásticos, termoestables, elastómeros) podrían resultar apropiados? ¿Qué polímero en particular consideraría en primer término? ¿Qué información adicional relacionada con la aplicación y con las propiedades de los polímeros necesitaría conocerse para completar el diseño?
- 16-36** Diseñe un material polimérico, así como un proceso de formado o moldeo, para producir la cubierta para una computadora personal. ¿Cuáles son los requisitos de diseño y de conformado? ¿Qué clase de polímeros serían los más apropiados? ¿Qué polímero en particular consideraría en primer término? ¿Qué información adicional necesita conocer?
- 16-37** ¿Qué tipo de polímero puede utilizarse para que cubra el interior de la cápsula para alojar la cabeza del fémur de una prótesis de cadera? Analice los requerimientos necesarios para este tipo de polímero.

Problemas de cómputo

- 16-38** *Distribución del peso molecular de los polímeros.* Los datos siguientes se obtuvieron para

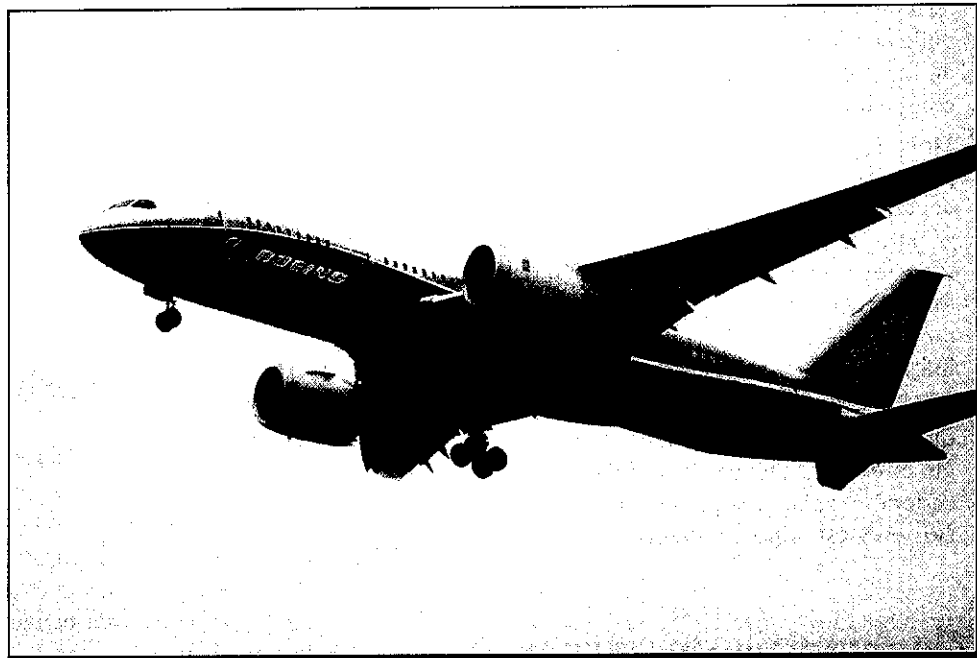
el polietileno. Determine el peso molecular promedio y el grado de polimerización.

Intervalo del peso molecular (g/mol)	f_i	x_i
0-3000	0.01	0.03
3000-6000	0.08	0.10
6000-9000	0.19	0.22
9000-12 000	0.27	0.36
12 000-15 000	0.23	0.19
15 000-18 000	0.11	0.07
18 000-21 000	0.06	0.02
21 000-24 000	0.05	0.01

Escriba un programa de cómputo o utilice una hoja de cálculo para resolver este problema.

Knovel® Problemas

- K16-1** Dé un ejemplo de un elastómero termoplástico (TPE) basado en una red polimérica interpenetrante (IPN). ¿Cómo está hecho?
- K16-2** ¿Cómo afecta la longitud de cadena a la temperatura de transición vítrea de los polímeros? Encuentre una ecuación que describa esta relación.
- K16-3** Los fenólicos bloqueados son antioxidantes orgánicos comunes. ¿Para qué clases de plástico se usan?



En un esfuerzo por aumentar la eficiencia y también reducir costos de combustible, las compañías de la industria aeroespacial buscan incorporar materiales más ligeros y más fuertes en aviones. En 2009, la Boeing realizó el primer vuelo de prueba exitoso del Boeing 787 Dreamliner. Una de las principales innovaciones de ese avión es el extenso uso de materiales compuestos, que se obtienen al agregar componentes de fase múltiple en un material, de modo tal que las propiedades del material resultante son únicas y no se pueden obtener de otro modo. Los compuestos constituyen la mitad del peso total del Dreamliner. Por ejemplo, el fuselaje del Boeing 787 está hecho de plástico reforzado con fibras de carbono, que es un compuesto de fibra de carbono en una matriz epóxica. Las fibras de carbono proporcionan resistencia y rigidez al material, y la matriz epóxica enlaza las fibras.

Materiales compuestos: trabajo en equipo y sinergia en materiales

¿Se ha preguntado alguna vez?

- ¿Cuáles son algunos de los materiales compuestos existentes de manera natural?
- ¿Por qué la concha del abulón, hecha principalmente de carbonato de calcio, es mucho más fuerte que la tiza, que también es de carbonato de calcio?
- ¿Por qué algunos instrumentos de deportes usan materiales compuestos?
- ¿Por qué los materiales compuestos se usan cada vez más en aviones y automóviles?

Los compuestos se forman cuando dos o más materiales o fases se utilizan juntas para obtener una combinación de propiedades que no se puede lograr de otra manera. Los compuestos se pueden seleccionar para alcanzar combinaciones no usuales de rigidez, peso, desempeño a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad. Los compuestos destacan la forma en que distintos materiales pueden trabajar en sinergia. La concha del abulón, la madera, el hueso y los dientes son ejemplos de materiales compuestos de origen natural. En la figura 17-1 se ilustran las microestructuras de compuestos seleccionados. Un ejemplo de un material que a macroescala sería un compuesto es el hormigón armado. Los compuestos a microescala incluyen materiales como los plásticos reforzados con fibra de carbono o con fibra de vidrio (PRFC o PRFV). Éstos ofrecen ventajas significativas en resistencias específicas y su uso es creciente en aviones, componentes electrónicos, automotores y artículos para deportes.

Tal como se mencionó en los capítulos 12 y 13, las aleaciones endurecidas por dispersión (como los aceros) y endurecidas por precipitación son ejemplos de materiales tradicionales **nanocompuestos**. En un nanocompuesto, la **fase dispersa** está formada por partículas a nanoescala distribuidas en una **fase matriz**. En esencia, se ha aplicado el mismo concepto al desarrollar lo que se describe como **nanocompuestos híbridos, orgánicos e inorgánicos**. Éstos son los materiales en los que la estructura molecular o microestructura de los compuestos consiste en una parte o bloque inorgánico y un bloque orgánico. La idea no es muy distinta de la formación de los copolímeros en bloque (capítulo 16). Éstos y otros compuestos funcionales

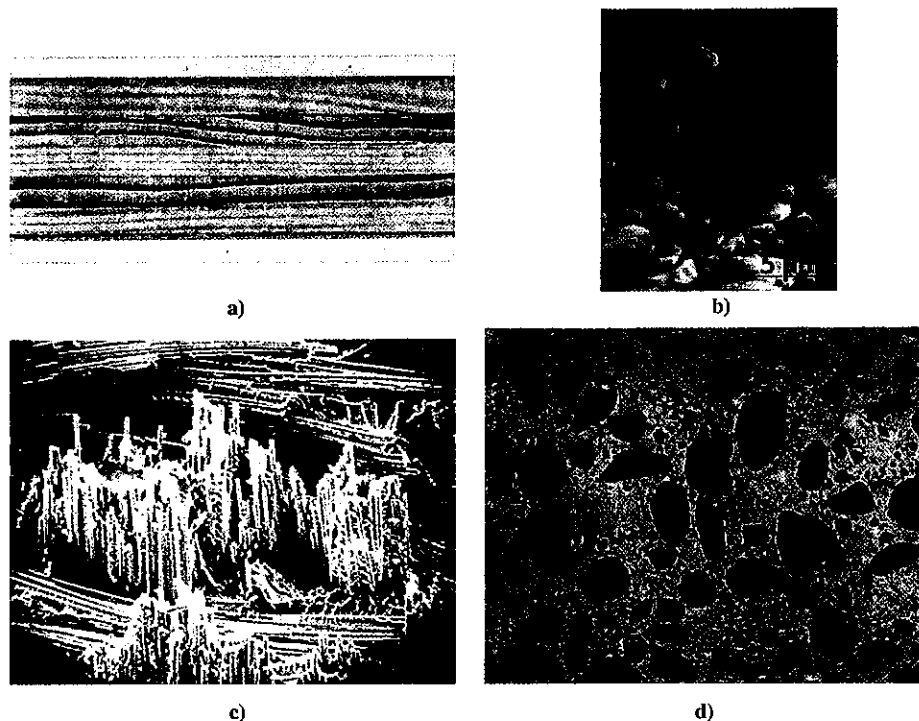


Figura 17-1 Algunos ejemplos de compuestos: a) el triplay o madera contrachapada es un compuesto laminado de capas de chapa de madera, b) la concha de abulón es un compuesto de plaquetas aragoníticas (CaCO_3 ortorrómbicas) rodeadas por capas de 10 nm de grueso de una matriz orgánica proteinácea. (Cortesía del profesor Mehmet Sarikaya, Universidad de Washington, Seattle), c) la fibra de vidrio es un compuesto reforzado con fibras de vidrio rígidas y fuertes en una matriz más blanda de polímero (175×) y d) el concreto, que es un material compuesto de partículas de arena gruesa o de grava en una matriz de cemento (reducida en 50%). (Las imágenes a), c) y d) son reimpresas por cortesía de Don Askeland.)

pueden dar combinaciones inusuales de propiedades electrónicas, magnéticas u ópticas. Por ejemplo, un material dieléctrico poroso preparado usando vidrios inorgánicos separados por fases tiene una constante dieléctrica inferior a la del mismo material sin porosidad. Las losetas del transbordador espacial hechas de fibras de sílice son de peso ligero porque están hechas de fibras de sílice y de aire, con una conductividad térmica muy pequeña. Las dos fases en estos ejemplos serían los materiales cerámicos y el aire. Muchos cerámicos vítreos son compuestos a nanoescala de diferentes fases de materiales cerámicos; otros pueden considerarse también como compuestos. Por ejemplo, el Dylark™ es un material compuesto de anhídrido maleico y un copolímero del estireno. Contiene negro de carbono para aumentar su rigidez y protegerlo contra los rayos ultravioleta. También contiene fibra de vidrio a fin de aumentar el módulo de Young y caucho para su tenacidad. Los materiales epóxicos pueden llenarse de plata para aumentar su conductividad térmica. Algunos materiales dieléctricos se hacen usando múltiples fases de manera que las propiedades dieléctricas generales de interés (por ejemplo la constante dieléctrica) no cambian de modo apreciable con la temperatura (dentro de cierto intervalo). Algunas estructuras compuestas pueden estar formadas por diferentes materiales acomodados en capas distintas. Esto lleva a lo que se conoce como materiales y estructuras funcionalmente graduadas. Por ejemplo, el recubrimiento de zirconia estabilizada con itrio (YSZ) en un álabe de turbina tendrá otras capas intermedias que aportan la unión con el material del álabe de la turbina. El recubrimiento de YSZ en sí contiene niveles de porosidad que son

esenciales para dar protección contra altas temperaturas (capítulo 5). Del mismo modo, los recubrimientos en vidrio son ejemplos de estructuras compuestas. De este modo, el *concepto* de usar compuestos es genérico y puede aplicarse a escalas macro, micro y nano.

En los compuestos son importantes las propiedades y fracciones volumétricas de cada fase individual; también es muy importante la conectividad de las fases. En general, la fase matriz es la fase continua y se dice que la otra fase es la fase dispersa. De este modo, el término "matriz metálica" indica un material metálico utilizado para formar la fase continua.

La conectividad se refiere a la forma en que dos o más fases están interconectadas en el compuesto. Los compuestos suelen clasificarse en función de la forma o la naturaleza de la fase dispersa (por ejemplo compuestos reforzados con partículas, bigotes o con fibras). Los **bigotes** son como las fibras, aunque su tamaño es mucho menor. La unión entre partículas, bigotes o fibras y la matriz también es muy importante. En compuestos estructurales, se usan moléculas poliméricas conocidas como "agentes de acoplamiento." Estas moléculas forman uniones con la fase dispersa y se integran también en la fase matriz continua.

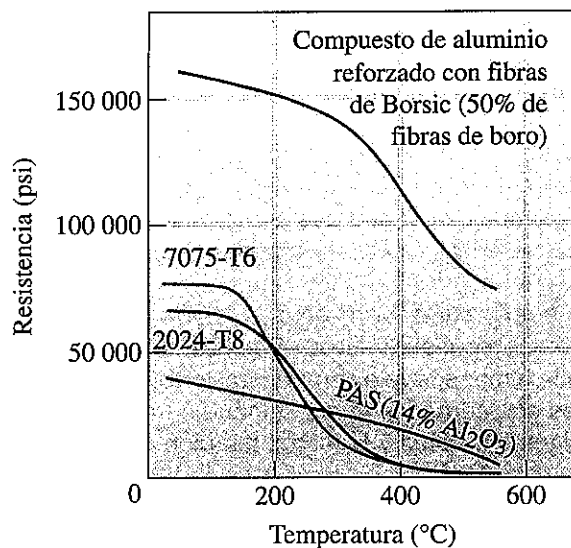
El énfasis en este capítulo está principalmente en compuestos utilizados en aplicaciones estructurales o mecánicas. Los compuestos se pueden organizar en tres clases: con partículas, con fibras y laminares, con base en las formas de los materiales (figura 17-1). El concreto, que es una mezcla de cemento y de grava, es un material particulado; la fibra de vidrio, con fibras de vidrio incrustadas en un polímero, es un compuesto reforzado con fibras, y el triplay o madera contrachapada, con capas alternas de chapa de madera, es un compuesto laminar. Si las partículas de refuerzo están distribuidas de manera uniforme, los materiales compuestos particulados tienen propiedades isotrópicas; los compuestos con fibras pueden ser isotrópicos o anisotrópicos; los compuestos laminares siempre presentan un comportamiento anisotrópico.

17-1 **Materiales compuestos endurecidos por dispersión**

Un grupo especial de nanocompuestos endurecidos por dispersión y que contienen partículas de 10 a 250 nm de diámetro se clasifican como compuestos particulados. Estos **dispersoides**, por lo general un óxido metálico, se introducen en la matriz por medios distintos de las transformaciones de fase tradicionales (capítulos 12 y 13). Aun cuando las pequeñas partículas no son coherentes en relación con la matriz, bloquean el movimiento de dislocaciones y producen un efecto endurecedor pronunciado.

A temperatura ambiente, los compuestos endurecidos por dispersión pueden ser más débiles que las aleaciones tradicionales de endurecimiento por envejecimiento, que contienen un precipitado coherente. Sin embargo, dado que los compuestos no se ablandan en forma catastrófica por exceso de envejecimiento, exceso de revenido, crecimiento de granos o engrosamiento de la fase dispersa, la resistencia de los mismos se reduce sólo de manera gradual al incrementarse la temperatura (figura 17-2). Además, su resistencia a la termofluencia (fluencia lenta) es superior a la de los metales y aleaciones.

El dispersoide debe tener una baja solubilidad en la matriz y no debe reaccionar químicamente con la misma, pero una pequeña cantidad de solubilidad podría ayudar a mejorar los enlaces entre el dispersante y la matriz. El óxido de cobre (Cu_2O) se disuelve en el cobre a altas temperaturas, por lo cual el sistema Cu_2O -Cu no resultaría eficaz. El Al_2O_3 no se disuelve en aluminio. Sin embargo, el Al_2O_3 sí logra un eficaz material endurecido por dispersión.

**Figura 17-2**

Comparación de resistencia a la fluencia del compuesto de polvo de aluminio sinterizado (PAS) y endurecido por dispersión, contra la resistencia a la fluencia de dos aleaciones de aluminio de alta resistencia convencionales de dos fases. El compuesto tiene beneficios arriba de unos 300 °C. Para efectos de comparación, se ilustra un compuesto de aluminio reforzado con fibras.

Ilustraciones de materiales compuestos endurecidos por dispersión

La tabla 17-1 presenta algunos materiales de interés. Quizá el ejemplo clásico es el compuesto de polvo de aluminio sinterizado (PAS). Éste tiene una matriz de aluminio endurecida con hasta 14% de Al₂O₃. El compuesto se conforma utilizando metalurgia de polvos. En un primer método se mezclan polvos de aluminio y de alúmina, se compactan a alta presión y se sinterizan. En una segunda técnica, el polvo de aluminio se trata para agregar una película continua de óxido en cada partícula. Una vez compactado el polvo, durante el sinterizado, la película de óxido se rompe en minúsculas escamas rodeadas por el metal de aluminio.

Otro grupo importante de compuestos endurecidos por dispersión incluye los metales de toria dispersa (TD), como el níquel TD (figura 17-3). El níquel TD puede producirse mediante oxidación interna. El torio está presente en el níquel como elemento de aleación. Una vez fabricado un polvo compacto, se permite la difusión del oxígeno dentro del metal para que reaccione con el torio y produzca toria (ThO₂). El siguiente ejemplo ilustra los cálculos relacionados con un compuesto endurecido por dispersión.

TABLA 17-1 ■ Aplicaciones de materiales compuestos seleccionados, endurecidos por dispersión

Sistema	Aplicaciones
Ag-CdO	Materiales para contactos eléctricos
Al-Al ₂ O ₃	Posible uso en reactores nucleares
Be-BeO	Reactores aeroespaciales y nucleares
Co-ThO ₂ , Y ₂ O ₃	Posible uso en materiales magnéticos resistentes a la fluencia lenta
Ni-20% Cr-ThO ₂	Componentes de motores de turborreactores
Pb-PbO	Rejillas para batería
Pt-ThO ₂	Filamentos, componentes eléctricos
W-ThO ₂ , ZrO ₂	Filamentos, calefactores



Figura 17-3
Micrografía electrónica del níquel TD. Las partículas dispersas de ThO₂ tienen un diámetro de 300 nm o menos (2000×).
(De *Oxide Dispersion Strengthening*, p. 714, Gordon and Breach, 1968. © AIME.)

Ejemplo 17-1

Material compuesto de níquel- ThO_2

Suponga que al níquel se agrega 2% de ThO₂ en peso. Cada partícula de ThO₂ tiene un diámetro de 1000 Å. ¿Cuántas partículas están presentes en cada centímetro cúbico?

SOLUCIÓN

Las densidades del ThO₂ y del níquel son 9.69 y 8.9 g/cm³, respectivamente. La fracción volumétrica es

$$f_{\text{ThO}_2} = \frac{\frac{2}{9.69}}{\frac{2}{9.69} + \frac{98}{8.9}} = 0.0184$$

Por tanto, hay 0.0184 cm³ de ThO₂ por cm³ de material compuesto. El volumen de cada esfera de ThO₂ es

$$V_{\text{ThO}_2} = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3}\pi (0.5 \times 10^{-5} \text{ cm})^3 = 0.524 \times 10^{-15} \text{ cm}^3$$

$$\text{La concentración de partículas de ThO}_2 \text{ es } = \frac{0.0184}{0.524 \times 10^{-15}} = 35.1 \times 10^{12} \text{ de partículas/cm}^3$$

17-2 Compuestos particulados

Los compuestos particulados están diseñados para producir combinaciones poco comunes y no para mejorar la resistencia. Los compuestos particulados contienen grandes cantidades de partículas gruesas que no bloquean de manera eficiente la mezcla refractaria.

Regla de las mezclas Ciertas propiedades del compuesto particulado dependen sólo de cantidades relativas y propiedades de los constituyentes individuales. La **regla de**

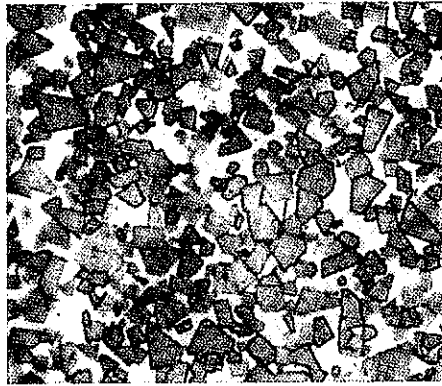


Figura 17-4

Microestructura del carburo de tungsteno, con un 20% de carburo de cobalto cementado (1300X).

(Fuente ASM Handbook, vol. 7 (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.)

las mezclas puede predecir estas reglas con exactitud. La densidad de un compuesto particulado, por ejemplo, es

$$\rho_c = \sum(f_i \rho_i) = f_1\rho_1 + f_2\rho_2 + \cdots + f_n\rho_n \quad (17-1)$$

donde ρ_c es la densidad del compuesto, $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ son las densidades de cada constituyente en el compuesto, y $f_1, f_2, \dots, f_n$ son las fracciones volumétricas de cada constituyente. Nótese que, para muchas propiedades, también es muy importante la conectividad de diferentes fases (es decir, la forma en que la fase dispersa está dispuesta con respecto a la fase continua).

Carburos cementados Los carburos cementados, o cermets, contienen partículas cerámicas duras dispersas en una matriz metálica (capítulo 15). Los insertos de carburo de tungsteno que se usan para herramientas de corte en operaciones de maquinado son comunes de este grupo. El carburo de tungsteno (WC) es un material cerámico duro, rígido y con una elevada temperatura de fusión. Para mejorar la tenacidad, las partículas de carburo de tungsteno se combinan con polvo de cobalto y se comprimen en preformas de polvo compactado. Estas últimas se calientan por encima de la temperatura de fusión del cobalto. El cobalto líquido envuelve cada una de las partículas sólidas del tungsteno (figura 17-4). Después de la solidificación, el cobalto sirve como aglutinante para el carburo de tungsteno y se obtiene una buena resistencia al impacto. Otros carburos, como el TaC y el TiC, también pueden incluirse en los cermets. El siguiente ejemplo ilustra el cálculo de la densidad para el carburo cementado.

Ejemplo 17-2

Carburos cementados

Una herramienta de corte de carburo cementado utilizada en una operación de maquinado contiene 75%pe de WC, 15%pe de TiC, 5%pe de TaC y 5%pe de Co. Estime la densidad del compuesto.

SOLUCIÓN

Primero debe convertir los porcentajes en peso a fracciones volumétricas. Las densidades de los componentes del compuesto son:

$$\rho_{WC} = 15.77 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{TiC} = 4.94 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{TaC} = 14.5 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{Co} = 8.83 \text{ g/cm}^3$$

$$f_{WC} = \frac{75/15.77}{75/15.77 + 15/4.94 + 5/14.5 + 5/8.83} = \frac{4.76}{8.70} = 0.546$$

$$f_{TiC} = \frac{15/4.94}{8.70} = 0.349$$

$$f_{TaC} = \frac{5/14.5}{8.70} = 0.040$$

$$f_{Co} = \frac{5/8.90}{8.70} = 0.065$$

Según la regla de las mezclas, la densidad del compuesto es

$$\begin{aligned} \rho_c &= \sum (f_i \rho_i) = (0.546)(15.77) + (0.349)(4.94) + (0.040)(14.5) \\ &\quad + (0.065)(8.83) \\ &= 11.5 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

Abrasivos Los discos para rectificado y corte se elaboran partiendo de la alúmina (Al_2O_3), del carburo de silicio (SiC) y del nitruro de boro cúbico (CBN). Para obtener tenacidad, las partículas abrasivas se unen mediante una matriz vítrea o polimérica. Los abrasivos de diamante normalmente se unen en una matriz metálica. Conforme se desgastan las partículas duras, éstas se fracturan o se desprenden de la matriz poniendo al descubierto nuevas superficies de corte.

Contactos eléctricos Los materiales que se utilizan en contactos eléctricos de interruptores y relevadores deben tener una buena combinación de resistencia al desgaste y conductividad eléctrica; de otra manera, los contactos se erosionan causando mal contacto y arco eléctrico. La plata reforzada con tungsteno proporciona esta combinación de características. Se prepara un compacto de polvo de tungsteno, utilizando procesos convencionales

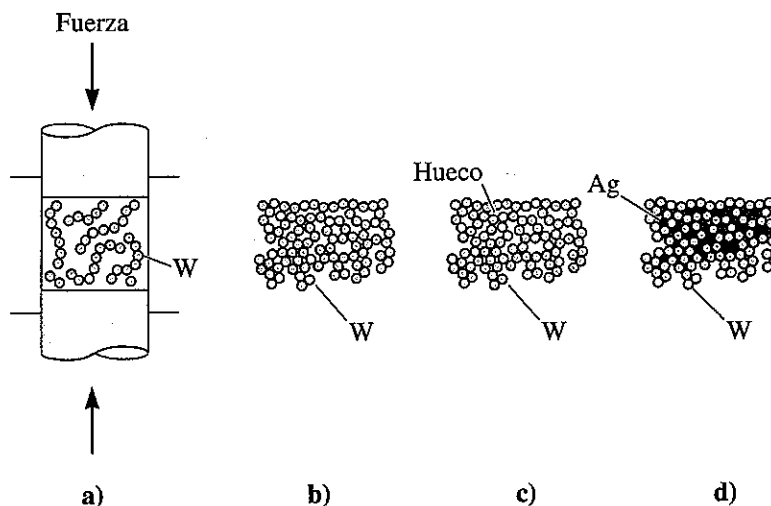


Figura 17-5 Pasos para la producción de un compuesto eléctrico de plata-tungsteno: a) se comprimen los polvos de tungsteno, b) resulta un producto de baja densidad, c) el sinterizado une los polvos de tungsteno y d) se infiltra plata líquida en los poros entre partículas.

de metalurgia de polvos (figura 17-5), para obtener una alta porosidad interconectada. Después se infiltra plata líquida mediante un vacío, a fin de llenar los huecos interconectados. Tanto la plata como el tungsteno son continuos. De esta manera, la plata pura conduce la corriente con eficiencia, al tiempo que el tungsteno duro aporta la resistencia al desgaste.

Ejemplo 17-3

Material compuesto de plata-tungsteno

Para producir contactos eléctricos se elabora un compuesto de plata-tungsteno, primeramente haciendo un compacto de tungsteno poroso por metalurgia de polvos e infiltrando después plata pura en los poros. La densidad del compacto de tungsteno antes de la infiltración es de 14.5 g/cm^3 . Calcule la fracción volumétrica de la porosidad y el porcentaje en peso final de plata en el compacto después de la infiltración.

SOLUCIÓN

Las densidades del tungsteno puro f_w y de la plata pura f_{Ag} son de 19.25 g/cm^3 y 10.49 g/cm^3 , respectivamente. Se puede suponer que la densidad de un poro es igual a cero, por lo que, de acuerdo con la regla de las mezclas:

$$\begin{aligned}\rho_c &= f_w \rho_w + f_{\text{poro}} \rho_{\text{poro}} \\ 14.5 &= f_w(19.25) + f_{\text{poro}}(0) \\ f_w &= 0.75 \\ f_{\text{poro}} &= 1 - 0.75 = 0.25\end{aligned}$$

Después de la infiltración, la fracción volumétrica de la plata es igual a la fracción volumétrica de los poros:

$$\begin{aligned}f_{Ag} &= f_{\text{poro}} = 0.25 \\ \% \text{pe Ag} &= \frac{(0.25)(10.49)}{(0.25)(10.49) + (0.75)(19.25)} \times 100 = 15\%\end{aligned}$$

Esta solución supone que todos los poros están abiertos o interconectados.

Polímeros Numerosos polímeros ingenieriles, que contienen rellenos y extensores, son compuestos particulados. Un ejemplo clásico es el negro de carbón en el caucho vulcanizado. El negro de carbón está formado por minúsculos esferoides de carbón de sólo 5 a 500 nm de diámetro. El negro de carbono mejora la resistencia, la rigidez, la dureza, la resistencia al desgaste, la resistencia a la degradación debida a los rayos ultravioleta, así como la resistencia del caucho a la temperatura. A los neumáticos de caucho se le agregan nanopartículas de sílice para aumentar su rigidez.

A fin de lograr que se requiera una cantidad más reducida del polímero, más costoso, se agregan extensores como carbonato de calcio (CaCO_3), esferas sólidas de vidrio y diversas arcillas. Es posible que los extensores hagan más rígido al polímero, incrementen la dureza y la resistencia al desgaste, incrementen la conductividad térmica, o bien, mejoren la resistencia a la termofluencia, aun cuando normalmente se reduce la resistencia y la ductilidad (figura 17-6). Si se agregan esferas de vidrio huecas, se puede conseguir el mismo cambio en las propiedades y al mismo tiempo reducir de manera significativa el peso del compuesto. Se pueden obtener otras propiedades especiales. Las partículas de elastómero se introducen en polímeros para mejorar la tenacidad de éstos. El polietileno puede ser cargado con polvos metálicos,

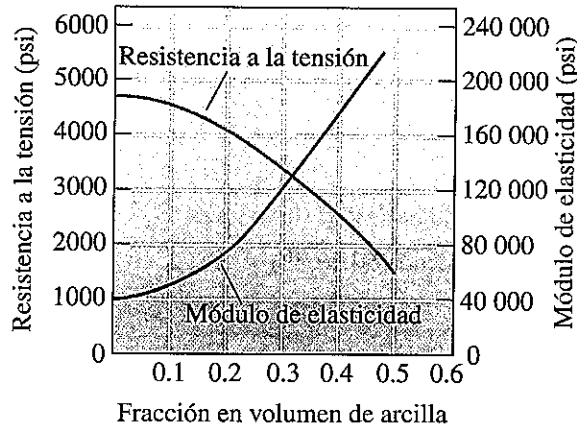


Figura 17-6
Efecto de la arcilla sobre las propiedades del polietileno.

como el plomo, para mejorar la absorción de productos de la fisión en aplicaciones nucleares. En el siguiente ejemplo se ilustra el diseño de un compuesto polimérico.

Ejemplo 17-4 *Diseño de un material compuesto polimérico particulado*

Diseñe un compuesto de polietileno relleno de arcilla, adecuado para el moldeo por inyección de compuestos de bajo costo. La pieza final debe tener una resistencia a la tensión de por lo menos 3000 psi y un módulo de elasticidad de no menos de 80 000 psi. El polietileno cuesta aproximadamente 50 centavos de dólar por libra y, la arcilla, aproximadamente 5 centavos de dólar por libra. La densidad del polietileno es de 0.95 g/cm^3 y la de la arcilla es de 2.4 g/cm^3 .

SOLUCIÓN

En la figura 17-6, se encuentra que se requiere una fracción volumétrica de arcilla por debajo de 0.35 para mantener una resistencia a la tensión superior a los 3000 psi, en tanto que se necesita una fracción volumétrica de por lo menos 0.2 para obtener el módulo de elasticidad mínimo. Para reducir el costo al mínimo, se usa toda la arcilla permisible; es decir, una fracción volumétrica de 0.35.

En 1000 cm^3 de partes de compuesto, existen 350 cm^3 de arcilla y 650 cm^3 de polietileno, o sea

$$\frac{(350 \text{ cm}^3)(2.4 \text{ g/cm}^3)}{454 \text{ g/lb}} = 1.85 \text{ lb de arcilla}$$

$$\frac{(650 \text{ cm}^3)(0.95 \text{ g/cm}^3)}{454 \text{ g/lb}} = 1.36 \text{ lb de polietileno}$$

El costo de los materiales es:

$$(1.85 \text{ lb de arcilla})(\$0.05/\text{lb}) = \$0.0925$$

$$(1.36 \text{ lb de PE})(\$0.50/\text{lb}) = \$0.68$$

$$\text{total} = \$0.7725 \text{ por } 1000 \text{ cm}^3$$

Suponga que el peso es un factor determinante. La densidad del compuesto es

$$\rho_c = (0.35)(2.4) + (0.65)(0.95) = 1.46 \text{ g/cm}^3$$

Quizá sea conveniente sacrificar parte del ahorro, a fin de obtener un menor peso. Si se usa sólo una fracción volumétrica de 0.2 de arcilla, entonces (utilizando el mismo método señalado líneas antes) se encuentra que se necesitan 1.06 lb de arcilla y 1.67 lb de polietileno.

Ahora el costo de los materiales es:

$$\begin{aligned}(1.06 \text{ lb de arcilla})(\$0.05/\text{lb}) &= \$0.053 \\ (1.67 \text{ lb de polietileno})(\$0.50/\text{lb}) &= \$0.835 \\ \text{total} &= \$0.89 \text{ por } 1000 \text{ cm}^3\end{aligned}$$

La densidad del compuesto es:

$$\rho_c = (0.2)(2.4) + (0.8)(0.95) = 1.24 \text{ g/cm}^3$$

Los materiales cuestan ahora aproximadamente 15% más, pero se obtiene una reducción en peso de 15%.

Compuestos particulados de metales fundidos Las fundiciones de aluminio con partículas de SiC para aplicaciones automotrices, incluyendo pistones y bielas, representan una aplicación comercial importante para compuestos particulados (figura 17-7). Mediante un proceso especial, las partículas de SiC pueden ser humedecidas por el líquido, lo cual ayuda a evitar que las partículas cerámicas se hundan durante la solidificación.

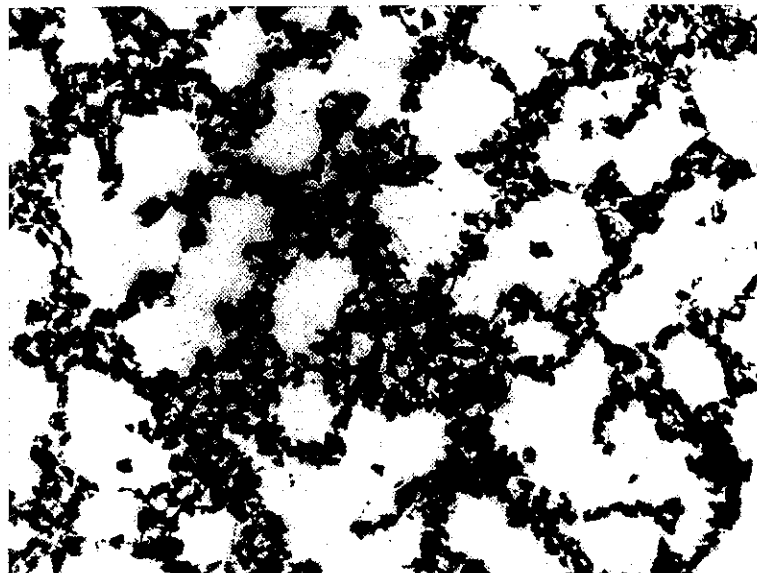


Figura 17-7 Microestructura de una aleación de una pieza fundida de aluminio reforzada con partículas de carburo con silicio. En este caso, las partículas de refuerzo han sido segregadas a las regiones interdendríticas de la fundición (125×). (Cortesía de David Kennedy y Lester B. Knight, Cast Metals, Inc.)

17-3 Compuestos reforzados con fibras

La mayor parte de los compuestos reforzados con fibras producen mayor resistencia a la fatiga, mejor módulo de Young y una mejor relación entre resistencia y peso, al incorporar fibras resistentes, rígidas aunque frágiles, en una matriz más blanda y más dúctil. El material de la matriz transmite la fuerza a las fibras, mismas que soportan la mayor parte de la fuerza aplicada. La matriz también proporciona protección para la superficie con fibras y reduce al mínimo la difusión de especies como el oxígeno o la humedad que pueden degradar las propiedades mecánicas de las fibras. La resistencia del compuesto puede resultar alta tanto a temperatura ambiente como a temperaturas elevadas (figura 17-2).

Se utilizan muchos tipos de materiales de refuerzo. Durante siglos se usó paja para reforzar los ladrillos de barro. En las estructuras de concreto se introducen varillas de acero de refuerzo. Las fibras de vidrio en una matriz polimérica producen fibra de vidrio para aplicaciones en transportes y naves aeroespaciales. Fibras hechas de boro, carbono, polímeros (por ejemplo aramidas, capítulo 16) y materiales cerámicos proporcionan un refuerzo excepcional en los compuestos avanzados, basados en matrices de polímeros, metales, materiales cerámicos e incluso compuestos intermetálicos.

La regla de las mezclas en compuestos reforzados con fibra Igual que en el caso de los compuestos particulados, la regla de las mezclas dará siempre la densidad de compuestos reforzados con fibra:

$$\rho_c = f_m \rho_m + f_f \rho_f \quad (17-2)$$

donde los subíndices m y f se refieren a la matriz y a las fibras. Nótese que $f_m = 1 - f_f$.

Además, la regla de las mezclas predice con exactitud las conductividades térmica y eléctrica de los compuestos reforzados con fibras a lo largo de la dirección de las mismas, si éstas son *continuas* y *unidireccionales*:

$$k_c = f_m k_m + f_f k_f \quad (17-3)$$

$$\sigma_c = f_m \sigma_m + f_f \sigma_f \quad (17-4)$$

donde k es la conductividad térmica y σ es la conductividad eléctrica. La energía térmica o eléctrica se puede transferir por todo el volumen del compuesto con una rapidez proporcional a la fracción volumétrica del material conductor. En un compuesto con una matriz de metal y fibras cerámicas, el grueso de la energía pasaría a través de la matriz; en un compuesto formado por una matriz polimérica que contenga fibras metálicas, la energía sería transferida a través de las fibras.

Cuando las fibras no son continuas o unidireccionales, es posible que no sea aplicable la simple regla de las mezclas. Por ejemplo, en un compuesto de matriz polimérica con fibras metálicas, la conductividad eléctrica sería baja y dependería de la longitud de las fibras, de la fracción volumétrica de las mismas y con qué frecuencia se tocan entre sí las fibras. Lo anterior se expresa usando el concepto de conectividad de las fases.

Módulo de elasticidad Para determinar el módulo de elasticidad, se utiliza la regla de las mezclas siempre que las fibras sean continuas y unidireccionales. Paralelo a las fibras, el módulo de elasticidad puede alcanzar valores de hasta

$$E_{c||} = f_m E_m + f_f E_f \quad (17-5)$$

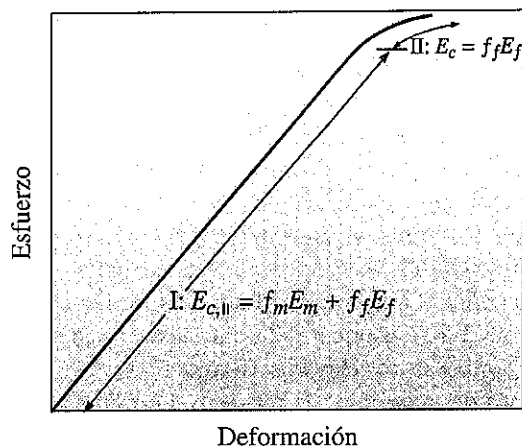


Figura 17-8

Curva esfuerzo-deformación de un compuesto reforzado con fibras. En esfuerzos reducidos (región I), el módulo de elasticidad se obtiene mediante la regla de las mezclas. En esfuerzos más elevados (región II), la matriz se deforma y la curva ya no sigue la regla de las mezclas.

Cuando el esfuerzo aplicado es muy elevado, la matriz empieza a deformarse y la curva esfuerzo-deformación deja de ser lineal (figura 17-8). Dado que ahora la matriz sólo contribuye un poco a la rigidez del compuesto, el módulo se puede estimar de manera aproximada por:

$$E_{c,||} = f_f E_f \quad (17-6)$$

Cuando la carga se aplica perpendicularmente a las fibras, cada uno de los componentes del compuesto actuará en forma independiente del otro. Ahora el módulo de elasticidad del compuesto es:

$$\frac{1}{E_{c,\perp}} = \frac{f_m}{E_m} + \frac{f_f}{E_f} \quad (17-7)$$

De nuevo, si las fibras no son continuas ni unidireccionales, la regla de las mezclas no es aplicable.

Los siguientes ejemplos ilustran más estos conceptos.

Ejemplo 17-5

Regla de las mezclas para compuestos: esfuerzo paralelo a las fibras

Deduzca la regla, de las mezclas (ecuación 17-5) para el módulo de elasticidad de un compuesto reforzado con fibras cuando se le aplica un esfuerzo (σ) a lo largo del eje de las fibras.

SOLUCIÓN

La fuerza total que actúa sobre el compuesto es la suma de las fuerzas que soportan cada uno de los constituyentes:

$$F_c = F_m + F_f$$

Dado que $F = \sigma A$:

$$\begin{aligned} \sigma_c A_c &= \sigma_m A_m + \sigma_f A_f \\ \sigma_c &= \sigma_m \left(\frac{A_m}{A_c} \right) + \sigma_f \left(\frac{A_f}{A_c} \right) \end{aligned}$$

Si las fibras tienen una sección transversal uniforme, la fracción de área es igual a la fracción volumétrica f :

$$\sigma_c = \sigma_m f_m + \sigma_f f_f$$

De la ley de Hooke, $\sigma = \epsilon E$. Por tanto,

$$E_{c\parallel} \epsilon_c = E_m \epsilon_m f_m + E_f \epsilon_f f_f$$

Si las fibras están unidas rígidamente a la matriz, tanto las fibras como la matriz deberán estirarse en cantidades iguales (condiciones de isodeformación):

$$\epsilon_c = \epsilon_m = \epsilon_f$$

$$E_{c\parallel} = f_m E_m + f_f E_f$$

Ejemplo 17-6

Módulo de elasticidad para los compuestos esfuerzo perpendicular a las fibras

Deduzca la ecuación del módulo de elasticidad de un compuesto reforzado con fibras al aplicársele un esfuerzo en dirección perpendicular al eje de las fibras (ecuación 17-7).

SOLUCIÓN

En este ejemplo, las deformaciones ya no son iguales; en cambio, la suma ponderada de las deformaciones de cada uno de los componentes es igual a la deformación total del compuesto, en tanto que en cada componente los esfuerzos son iguales (condición de isoesfuerzo):

$$\begin{aligned}\epsilon_c &= f_m \epsilon_m + f_f \epsilon_f \\ \frac{\sigma_c}{E_c} &= f_m \left(\frac{\sigma_m}{E_m} \right) + f_f \left(\frac{\sigma_f}{E_f} \right)\end{aligned}$$

Como $\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f$,

$$\frac{1}{E_{c\perp}} = \frac{f_m}{E_m} + \frac{f_f}{E_f}$$

Resistencia de los compuestos La resistencia a la tensión de un compuesto reforzado con fibras (TS_c) depende de la unión entre las fibras y la matriz. A veces se utiliza la regla de las mezclas para tener una aproximación de la resistencia a la tensión de un compuesto que contenga fibras continuas y paralelas:

$$TS_c = f_f TS_f + f_m S_m \quad (17-8)$$

donde TS_f es la resistencia a la tensión de la fibra y σ_m es el esfuerzo que actúa sobre la matriz cuando el compuesto está deformado hasta el punto en que las fibras se fracturan. Por tanto, S_m no es la resistencia a la tensión de la matriz. Otras propiedades, como la ductilidad, propiedades al impacto, a la fatiga y a la termofluencia son difíciles de predecir incluso en el caso de fibras alineadas unidireccionalmente.

Ejemplo 17-7**Materiales compuestos de aluminio y boro**

El boro recubierto con aluminio reforzado SiC (o Borsic) con 40% en volumen de fibras es un compuesto importante, ligero y de alta temperatura. Estime la densidad, el módulo de elasticidad y la resistencia a la tensión paralelos al eje de las fibras. También estime el módulo de elasticidad perpendicular a las mismas.

SOLUCIÓN

Las propiedades de cada uno de los componentes aparecen a continuación.

Material	Densidad (ρ) (g/cm ³)	Módulos de elasticidad (E) (psi)	Resistencia a la tensión (TS) (psi)
Fibras	2.36	55 000 000	400 000
Aluminio	2.70	10 000 000	5000

De la regla de las mezclas:

$$\rho_c = (0.6)(2.7) + (0.4)(2.36) = 2.56 \text{ g/cm}^3$$

$$E_{c,\parallel} = (0.6)(10 \times 10^6) + (0.4)(55 \times 10^6) = 28 \times 10^6 \text{ psi}$$

$$TS_c = (0.6)(5000) + (0.4)(400\,000) = 163\,000 \text{ psi}$$

Observe que el cálculo de la resistencia a la tensión es sólo una aproximación. Perpendicular a las fibras:

$$\frac{1}{E_{c,\perp}} = \frac{0.6}{10 \times 10^6} + \frac{0.4}{55 \times 10^6} = 0.06727 \times 10^{-6}$$

$$E_{c,\perp} = 14.9 \times 10^6 \text{ psi}$$

En la figura 17-9 se ilustra el módulo real y la resistencia paralela a las fibras. El módulo de elasticidad calculado (28×10^6 psi) es exactamente el mismo que el módulo medido. La resistencia estimada (unas 163 000 psi) es considerablemente superior a la real (alrededor de 130 000 psi). Se observa también que el módulo de elasticidad es bastante anisotrópico, con el módulo perpendicular a las fibras igual a sólo la mitad del módulo paralelo a las mismas.

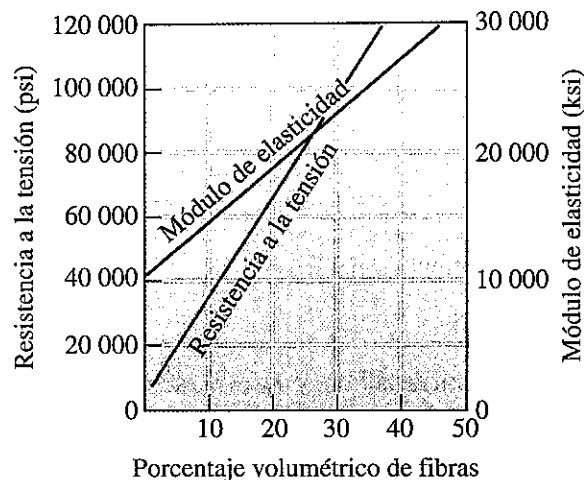


Figura 17-9

Influencia del porcentaje volumétrico de fibras de boro recubiertas de SiC (Borsic), sobre las propiedades del aluminio reforzado con Borsic, en la dirección paralela a las fibras (para el ejemplo 17-7).

Ejemplo 17-8*Compuesto de nylon con fibras de vidrio*

Las fibras de vidrio en el nylon proporcionan refuerzo. Si el nylon contiene 30% volumétrico de vidrio E, ¿qué fracción de la fuerza aplicada soportan las fibras de vidrio?

SOLUCIÓN

El módulo de elasticidad de cada uno de los componentes del compuesto es

$$E_{\text{vidrio}} = 10.5 \times 10^6 \text{ psi} \quad E_{\text{nylon}} = 0.4 \times 10^6 \text{ psi}$$

Si la unión es buena, tanto el nylon como las fibras de vidrio estarán sujetos a un esfuerzo igual; por tanto

$$\begin{aligned} \epsilon_c &= \epsilon_m = \epsilon_f \\ \epsilon_m &= \frac{\sigma_m}{E_m} = \epsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} \\ \frac{\sigma_f}{\sigma_m} &= \frac{E_f}{E_m} = \frac{10.5 \times 10^6}{0.4 \times 10^6} = 26.25 \end{aligned}$$

Así, la fracción de la fuerza soportada por las fibras está dada por

$$\begin{aligned} \text{Fracción} &= \frac{F_f}{F_f + F_m} = \frac{\sigma_f A_f}{\sigma_f A_f + \sigma_m A_m} = \frac{\sigma_f (0.3)}{\sigma_f (0.3) + \sigma_m (0.7)} \\ &= \frac{0.3}{0.3 + 0.7(\sigma_m/\sigma_f)} = \frac{0.3}{0.3 + 0.7(1/26.25)} = 0.92 \end{aligned}$$

donde F_f es la fuerza soportada por las fibras y F_m es la fuerza soportada por la matriz.

Casi toda la carga es soportada por las fibras de vidrio.

17-4 Características de compuestos reforzados con fibras

Al diseñar un compuesto reforzado con fibras, deben tomarse en consideración numerosos factores, incluyendo longitud, diámetro, orientación, cantidad y propiedades de las fibras, así como las propiedades de la matriz y de la unión entre las fibras y la matriz.

Longitud y diámetro de las fibras Las fibras pueden ser cortas, largas o incluso continuas. A menudo, sus dimensiones se caracterizan en función de la **proporción dimensional** l/d , donde l es la longitud de la fibra y d es su diámetro. Las fibras comunes tienen diámetros que varían desde $10 \mu\text{m}$ ($10 \times 10^{-4} \text{ cm}$) hasta $150 \mu\text{m}$ ($150 \times 10^{-4} \text{ cm}$).

La resistencia del compuesto se mejora cuando la proporción dimensional es grande. Con frecuencia, las fibras se fracturan debido a defectos superficiales. Al hacer que los diámetros sean tan pequeños como sea posible, las fibras tienen menos área superficial y, en consecuencia, menos defectos que pudieran propagarse durante el proceso o bajo carga. También se prefieren las fibras largas. Los extremos de una fibra soportan menos carga que el resto; en consecuencia, cuantos menos extremos existan, mayor será la capacidad de absorción de carga de las fibras (figura 17-10).

En muchos sistemas reforzados con fibra, se utilizan fibras discontinuas con una proporción dimensional superior al de cierto valor crítico para llegar a un término medio

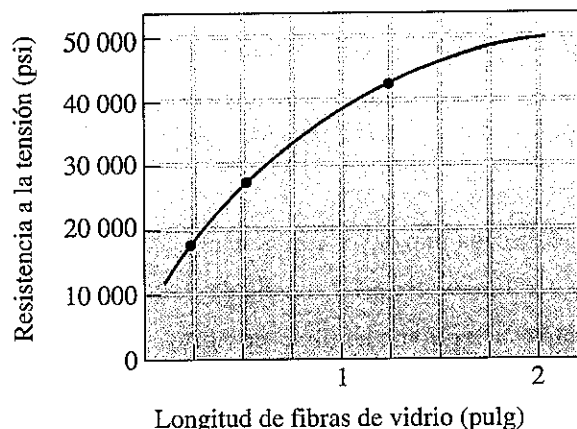


Figura 17-10

Si se incrementa la longitud de las fibras de vidrio E cortadas existentes en una matriz de resina epóxica, se aumenta la resistencia del compuesto. En este ejemplo, la fracción volumétrica de fibras de vidrio es aproximadamente 0.5.

aceptable entre facilidad de proceso y propiedades. Se puede llegar a determinar una longitud crítica de la fibra l_c , para cualquier diámetro de fibra d dada:

$$l_c = \frac{TS_f d}{2\tau_i} \quad (17-9)$$

donde TS_f es la resistencia de la fibra a la tensión y τ_i está relacionada con la resistencia de la unión entre la fibra y la matriz, o con el esfuerzo en el que la matriz empieza a deformarse. Si la longitud de la fibra l es inferior a l_c , se observará poco efecto de refuerzo; si l es mayor que aproximadamente $15l_c$, la fibra se comportará casi como si fuera continua. La resistencia de compuesto se puede estimar a partir de

$$\sigma_c = f_f TS_f \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + f_m S_m \quad (17-10)$$

donde S_m es el esfuerzo que se ejerce sobre la matriz cuando las fibras se rompen.

Cantidad de fibras Una fracción volumétrica mayor de fibras incrementa la resistencia y la rigidez del compuesto, como se podría esperar a partir de la regla de las mezclas. La fracción volumétrica máxima es de aproximadamente 80%, más allá de la cual las fibras ya no pueden estar totalmente recubiertas o rodeadas por la matriz.

Orientación de fibras Las fibras de refuerzo pueden introducirse en la matriz con diversas orientaciones. Las fibras cortas de orientación aleatoria y con una pequeña proporción dimensional, el caso común es el de las fibras de vidrio, son fáciles de introducir en la matriz y le dan al compuesto un comportamiento relativamente isotrópico.

Las configuraciones de fibras largas, o incluso continuas y unidireccionales, producen propiedades anisotrópicas, con una resistencia y rigidez particularmente buenas en dirección paralela a las fibras. Estas fibras se conocen como capas a 0° , lo cual muestra que todas las fibras están alineadas en la dirección del esfuerzo aplicado. Sin embargo, las orientaciones unidireccionales originan malas propiedades si la carga es perpendicular a dichas fibras (figura 17-11).

Una de las características únicas de los compuestos reforzados con fibra es que se pueden adaptar sus propiedades para que cubran diferentes tipos de condiciones de carga. Se pueden introducir, en varias direcciones dentro de la matriz, fibras largas y continuas (figura 17-12); en configuraciones ortogonales (capas $0^\circ/90^\circ$), se pueden obtener buenas resistencias en dos direcciones perpendiculares. Las configuraciones más complejas (como capas $0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$) dan refuerzo en múltiples direcciones.

Las fibras también pueden ordenarse en patrones tridimensionales. Incluso en el más simple de los tejidos, las fibras de cada capa individual de tela tienen algún pequeño grado de

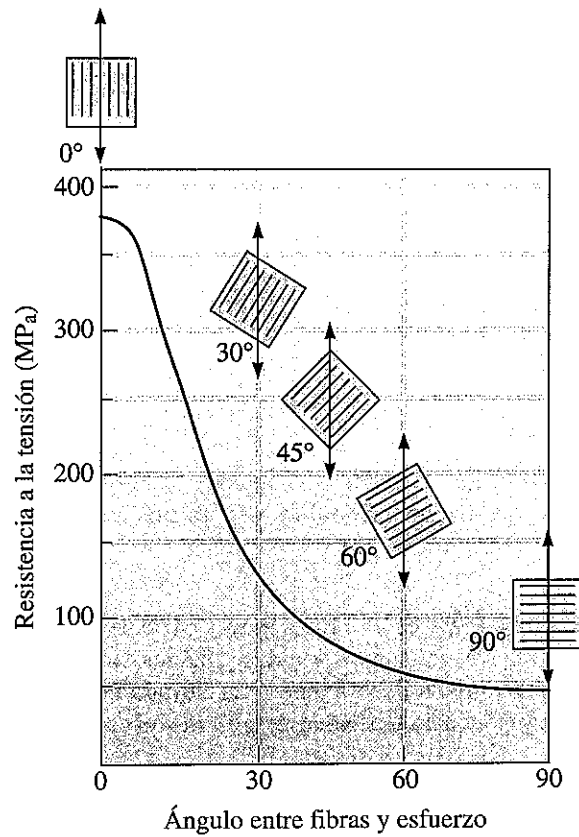


Figura 17-11

Efecto de la orientación de la fibra sobre la resistencia a la tensión de compuestos epoxídicos reforzados con fibras de vidrio E.

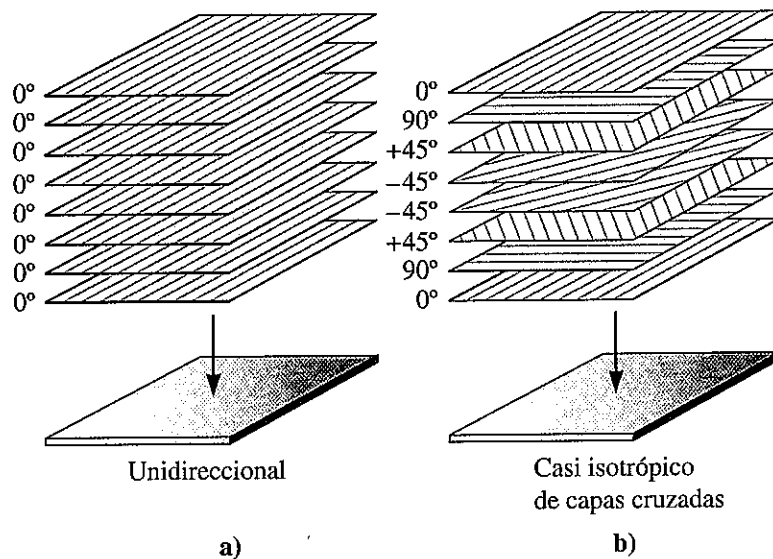


Figura 17-12 a) Se pueden unir cintas con fibras alineadas para producir una estructura compuesta unidireccional de varias capas. b) Se pueden unir cintas con fibras alineadas en varias orientaciones para producir un compuesto casi isotrópico. En este caso, se ha formado un compuesto $0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$.

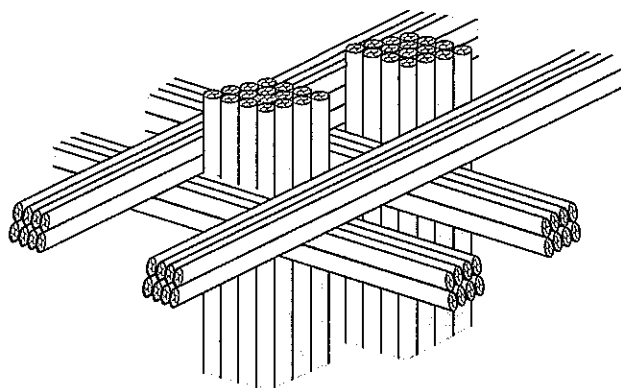


Figura 17-13
Tejido tridimensional para
compuestos reforzados con
fibra.

orientación en una tercera dirección. Cuando las capas de tela están tejidas o cocidas unas con otras, se obtiene un esfuerzo tridimensional mayor. También se pueden utilizar tejidos tridimensionales más complejos (figura 17-13).

Propiedades de las fibras En la mayor parte de los materiales compuestos reforzados con fibras, las fibras son resistentes, rígidas y ligeras. Si el compuesto se utiliza a temperaturas elevadas, la fibra también deberá tener una elevada temperatura de fusión. Por tanto, la **resistencia específica** y el **módulo específico** de la fibra son características importantes:

$$\text{Resistencia específica} = \frac{TS}{\rho} \quad (17-11)$$

$$\text{Módulo específico} = \frac{E}{\rho} \quad (17-12)$$

donde TS es la resistencia a la tensión, ρ es la densidad y E es el módulo de elasticidad.

Las propiedades de fibras comunes aparecen en la tabla 17-2 y la figura 17-14. Nótese que en la tabla 17-2 las unidades de densidad son g/cm^3 . También observe que $1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 0.0361 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^3}$. Por lo general, el módulo específico más alto se presenta en materiales

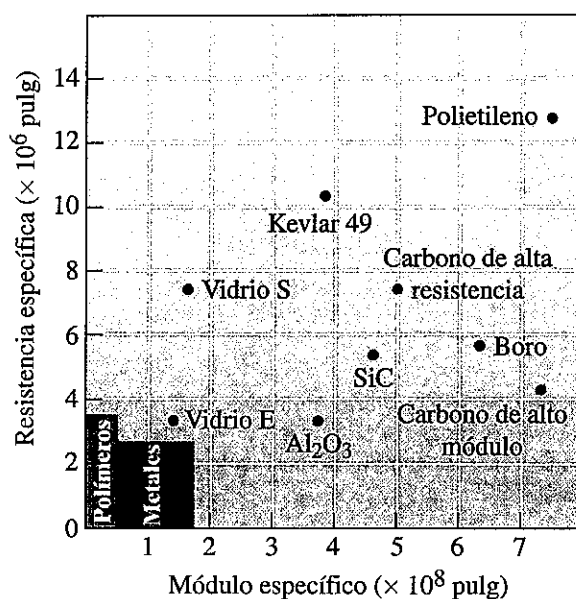


Figura 17-14
Resistencia y módulo específicos
de las fibras, comparadas con
las de los metales y polímeros.

TABLA 17-2 ■ Propiedades de materiales de refuerzo seleccionados*

Material	Densidad (ρ) (g/cm ³)	Resistencia a la tensión (ksi)	Módulo de elasticidad (E) ($\times 10^6$ psi)	Temperatura de fusión (°C)	Módulo específico ($\times 10^7$ pulg)	Resistencia específica ($\times 10^6$ pulg)
Polímeros:						
Kevlar™	1.44	650	18.0	500	34.7	12.5
Nylon	1.14	120	0.4	249	1.0	2.9
Poliétileno	0.97	480	25.0	147	71.4	13.7
Metales:						
Be	1.85	185	41.6	1290	65.9	2.8
Boro	2.36	500	55.0	2076	64.6	4.7
W	19.25	580	59.6	3410	8.5	0.8
Vidrio:						
Vidrio E	2.55	500	10.5	< 1725	11.4	5.6
Vidrio S	2.50	650	12.6	< 1725	14.0	7.2
Carbono:						
HS (alta resistencia)	1.75	820	40.0	3700	63.5	13.0
HM (alto módulo)	1.90	270	77.0	3700	112.0	3.9
Materiales cerámicos:						
Al ₂ O ₃	3.95	300	56.0	2015	38.8	2.1
B ₄ C	2.36	330	70.0	2450	82.4	3.9
SiC	3.00	570	70.0	2700	47.3	5.3
ZrO ₂	4.84	300	50.0	2677	28.6	1.7
Bigotes:						
Al ₂ O ₃	3.96	3000	62.0	1982	43.4	21.0
Cr	7.20	1290	35.0	1890	13.4	4.9
Grafito	1.66	3000	102.0	3700	170.0	50.2
SiC	3.18	3000	70.0	2700	60.8	26.2
Si ₃ N ₄	3.18	2000	55.0		47.8	17.5

$$* 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 0.0361 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^3}$$

de bajo número atómico y enlaces covalentes, como en el caso del carbono y del boro. Estos dos elementos también tienen alta resistencia y una elevada temperatura de fusión.

Las **fibras de aramidas**, de las cuales el ejemplo más conocido es el Kevlar™, son polímeros poliamidas aromáticos endurecidos mediante una estructura con anillos de benceno (figura 17-15), y son ejemplos de polímeros cristalinos líquidos en los que las cadenas de polímeros tienen forma de varillas y son muy rígidas. También se dispone de fibras de polietileno especialmente preparadas. Tanto las fibras de aramidas como las de polietileno tienen excelente resistencia y rigidez, pero su uso está limitado a bajas temperaturas. Debido a su menor densidad, las fibras de polietileno ofrecen una resistencia específica y un módulo específico superior.

Las fibras cerámicas y los bigotes, incluyendo la alúmina, el vidrio y el carburo de silicio, son resistentes y rígidas. Las fibras de vidrio, que son las de uso más común, incluyen a la sílice pura, el vidrio S (25% de Al₂O₃, 10% de MgO y el resto es SiO₂), y el vidrio E (18% de CaO, 15% de Al₂O₃ y el resto es SiO₂). Aun cuando son considerablemente más densas que las fibras poliméricas, las fibras cerámicas se pueden utilizar a temperaturas mucho más

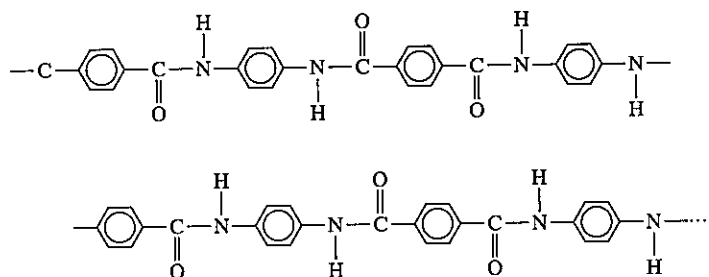


Figura 17-15 Estructura del Kevlar™. Las fibras están unidas mediante enlaces secundarios entre los átomos de oxígeno y de hidrógeno de cadenas adyacentes.

elevadas. El berilio y el tungsteno, a pesar de que tienen enlaces metálicos, tienen un elevado módulo que los hace atractivos para ciertas aplicaciones en materiales para fibras. El siguiente ejemplo analiza problemas relacionados con el diseño con materiales compuestos.

Ejemplo 17-9

Diseño de un material compuesto con fibra de boro

Actualmente se está utilizando una selección de aluminio 7075-T6 (con módulo de elasticidad de 10×10^6 psi) para fabricar un panel de 500 libras para una aeronave comercial. La experiencia ha demostrado que cada reducción de una libra, en el peso de la aeronave, disminuye el consumo de combustible en 500 galones al año. Diseñe un material para este panel, que reduzca el peso y aun así mantenga el mismo módulo específico y sea económico en los 10 años de vida útil de la aeronave.

SOLUCIÓN

Existen muchos materiales posibles que podrían utilizarse para ahorrar peso. Como ejemplo, vea una aleación Al-Li reforzada con fibras de boro en condición T6. Tanto la fibra de boro como la adición de la aleación de litio incrementan el módulo de elasticidad; el boro y la aleación Al-Li también tienen densidades inferiores a las de las aleaciones comunes de aluminio.

El módulo específico de la aleación actual 7075-T6 es:

$$\begin{aligned} \text{Módulo específico} &= \frac{(10 \times 10^6 \text{ psi})}{\left[\frac{\left(2.7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) \left(2.54 \frac{\text{cm}}{\text{pulg}}\right)^3}{454 \left(\frac{\text{g}}{\text{lb}}\right)} \right]} \\ &= 1.03 \times 10^8 \text{ pulg} \end{aligned}$$

La densidad de las fibras de boro es de aproximadamente 2.36 g/cm^3 (0.085 lb/pulg^3) y la de una aleación común Al-Li es de unos 2.5 g/cm^3 (0.09 lb/pulg^3). Si se utilizan fibras de boro en una fracción volumétrica de 0.6 dentro del compuesto, entonces la densidad, el módulo de elasticidad y el módulo específico de este compuesto son:

$$\rho_c = (0.6)(0.085) + (0.4)(0.09) = 0.087 \text{ lb/pulg}^3$$

$$E_{c_{||}} = (0.6)(55 \times 10^6) + (0.4)(11 \times 10^6) = 37 \times 10^6 \text{ psi}$$

$$\text{Módulo específico} = \frac{37 \times 10^6}{0.087} = 4.3 \times 10^8 \text{ pulg}$$

Si el módulo específico fuera el único factor que influyera en el diseño del componente, el espesor de la pieza podría reducirse en un 75% y su peso sería de 125 lb en lugar de 500 libras. El ahorro en peso sería entonces de 375 libras, o bien, lo que es lo mismo, $(500 \text{ galones/lb}) (375 \text{ lb}) = 187\,500 \text{ galones al año}$. Con un costo de aproximadamente \$2.50 por galón, se podría alcanzar un ahorro de \$470 000 en combustible cada año, es decir, \$4.7 millones durante la vida de la aeronave.

Esta es, obviamente, una comparación optimista, ya que otros factores, como la resistencia o factores de fabricación, podrían impedir que este componente se fabricara con un espesor tan pequeño como se sugiere. Además, el elevado costo de las fibras de boro (superior a \$300 por libra), así como costos más elevados de manufactura del compuesto en comparación con el aluminio 7075 reducirían este ahorro.

Propiedades de las matrices La matriz soporta las fibras y las mantiene en su posición correcta, transfiere la carga a las fibras fuertes, protege las fibras contra daños durante su manufactura y uso en el compuesto, y evita la propagación de grietas en las fibras hacia todo el compuesto. La matriz, por lo general, es la que aporta el control principal sobre las propiedades eléctricas, el comportamiento químico y el uso a temperaturas elevadas de un compuesto.

Las matrices poliméricas son particularmente comunes. La mayor parte de los materiales poliméricos, tanto termoplásticos como termoestables, se fabrican en grados reforzados con fibras cortas de vidrio. Estos compuestos se aprovechan en formas útiles mediante los procesos descritos en el capítulo 16. Los procesos de moldeo de láminas de compuestos (MLC) y los compuestos de moldeo en volumen (CMV) son típicos de este tipo de compuestos. Para aplicaciones a temperaturas un poco más elevadas, se utilizan poliimidas aromáticas termoestables.

Los compuestos de matriz metálica (CMM) incluyen aluminio, magnesio, cobre, níquel y aleaciones compuestas intermetálicas reforzadas con fibras cerámicas y metálicas. Mediante los compuestos de matriz metálica (CMM), se satisface una diversidad de aplicaciones aeroespaciales y automotrices. La matriz de metal permite que el compuesto funcione a altas temperaturas, pero a veces la producción del compuesto es más difícil y más costosa que la producción de los materiales con matriz polimérica.

Los compuestos con matriz cerámica (CMC) tienen buenas propiedades a temperaturas elevadas, y son de menor peso que los compuestos de matriz metálica para alta temperatura. Más adelante se verá cómo aumentar la tenacidad en los CMC.

Unión y falla Particularmente en los compuestos de matriz polimérica y metálica, debe obtenerse una buena unión entre los varios constituyentes. Las fibras deben estar firmemente unidas al material de la matriz para que la carga se transmita de manera correcta de la matriz a las fibras. Además, si la unión es débil, las fibras pueden salirse de la matriz durante la carga, reduciendo la robustez y la resistencia a la fractura del compuesto. La figura 17-16 ilustra una unión defectuosa de las fibras de carbono en una matriz de cobre. En algunos casos, se pueden utilizar recubrimientos especiales para mejorar esta unión. Las fibras de vidrio se recubren con un acoplamiento o "anclado" de silano (llamado *agarre*), a fin de mejorar la unión y la resistencia a la humedad en los compuestos con fibras de vidrio. De igual manera, las fibras de carbono se recubren con un material orgánico para mejorar la unión. Se han recubierto fibras de boro con carburo de silicio o nitruro de boro para mejorar la unión con la matriz de aluminio; de hecho, estas fibras se conocen como fibras Borsic, para indicar la presencia del recubrimiento del carburo de silicio (SiC).

Otra propiedad que debe tomarse en consideración al combinar fibras dentro de una matriz es la similitud entre los coeficientes de expansión térmica de ambos materiales. Si la fibra se expande y se contrae a una rapidez muy distinta de la matriz, las fibras pueden romperse o se puede desintegrar la unión, causando una falla prematura.

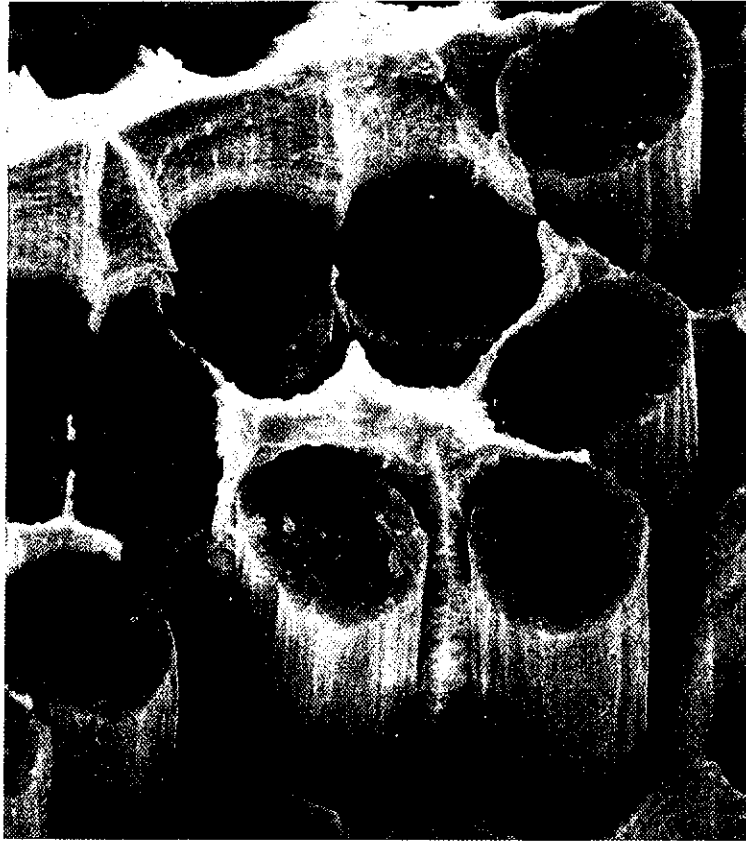


Figura 17-16 Micrografía electrónica de barrido de la superficie de fractura de una aleación de plata-cobre reforzada con fibras de carbono. Una mala unión es la causa de que gran parte de la superficie de fractura siga la interfaz entre la matriz metálica y las fibras de carbono (3000×). (Fuente: *ASM Handbook*, vol. 9, *Metallography and Microstructure* (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.)

En numerosos compuestos, se unen capas o chapas individuales de tejido. La unión entre estas capas también debe ser buena porque de lo contrario se puede presentar otro problema, la **delaminación**. Se ha sospechado que la delaminación es la causa de algunos accidentes de aeronaves que utilizan estructuras basadas en compuestos. Las capas se pueden separar bajo carga y causar una falla. Para evitar la delaminación se utilizan compuestos que tienen un tejido tridimensional.

17-5 Manufactura de fibras y compuestos

La producción de un compuesto reforzado con fibras implica varios pasos, incluyendo la producción de las fibras, la organización de las mismas en paquetes o en tejidos, así como la introducción de las fibras en la matriz.

Fabricación de las fibras Las fibras metálicas, las fibras de vidrio y muchas otras fibras poliméricas (incluyendo el nylon, la aramida y el poliacrilonitrilo) se pueden formar mediante procesos de estirado o trefilado como se describió en el capítulo 8 (estirado de alambres de metal) y en el capítulo 16 (utilización de un hilador de fibras de polímero).

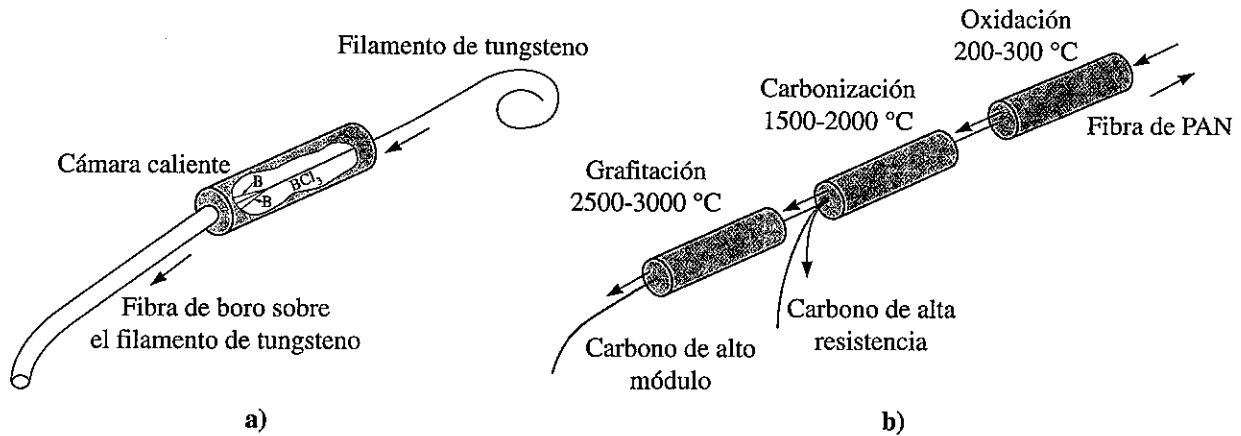
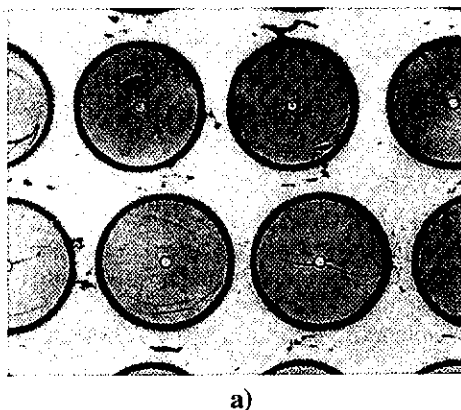


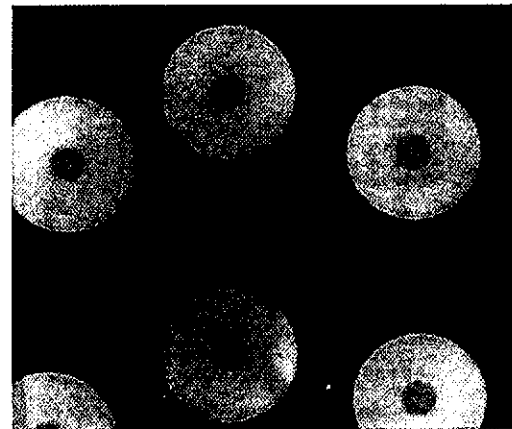
Figura 17-17 Métodos para producir fibras de a) boro y b) carbono.

El boro, el carbono y los materiales cerámicos son demasiado frágiles y reactivos para trabajarse utilizando procesos de estirado convencionales. La fibra de boro se produce por **deposición química de vapor (DQV)** [figura 17-17a)]. Como sustrato, se utiliza un filamento de tungsteno caliente, muy fino, que pasa por un sello en una cámara caliente. En la cámara, se introducen los compuestos de boro vaporizados como el BCl_3 , mismos que se desintegran y permiten que el boro se precipite sobre el alambre de tungsteno (figura 17-18). Las fibras de SiC se hacen de una manera similar, utilizando las fibras de carbono como sustrato para el depósito de vapores de carburo de silicio.

Las fibras de carbono se elaboran mediante la **carbonización** o pirolización de un filamento orgánico, que se puede estirar o hilar más fácilmente en tramos largos, delgados y continuos [figura 17-17b)]. El filamento orgánico, conocido como **precursor**, está hecho frecuentemente con rayón (un polímero celulósico), poliacrilonitrilo (PAN) o resina (diversos



a)



b)

Figura 17-18 Micrográficas de dos compuestos reforzados con fibra: a) aluminio reforzado con fibras de Borsic, con las fibras compuestas de una capa gruesa de boro depositada sobre un filamento de tungsteno de pequeño diámetro ($1000\times$). (Fuente: *ASM Handbook*, vol. 9, *Metallography and Microstructure* (1985), *ASM International*, Materials Park, OH 44073-0002.) b) En esta microestructura de un compuesto con matriz de cerámica y fibras cerámicas, se utilizan fibras de carburo de silicio para reforzar una matriz de nitruro de silicio. La fibra SiC se deposita en forma de vapor en un pequeño filamento precursor de carbono ($125\times$). (Cortesía del Dr. R.T. Bhatt, NASA Lewis Research Center.)

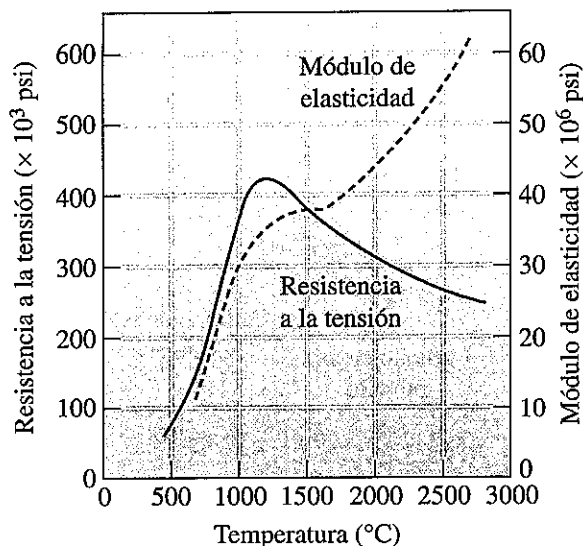


Figura 17-19

Efecto de la temperatura de un tratamiento térmico sobre la resistencia y el módulo de elasticidad de las fibras de carbono.

compuestos orgánicos aromáticos). Las altas temperaturas desintegran el polímero orgánico, expulsando todos los elementos, excepto el carbono. Conforme se incrementa la temperatura de carbonizado de 1000 a 3000 °C, la resistencia a la tensión se reduce, mientras que el módulo de elasticidad se incrementa (figura 17-19). El estirado de los filamentos de carbono en ciertos momentos específicos de la carbonización puede producir las orientaciones preferidas deseables en el filamento de carbono final.

Los **bigotes** son cristales individuales con proporciones dimensionales de 20 a 1000. Dado que los bigotes no contienen ninguna dislocación móvil, el deslizamiento no puede ocurrir y exhiben resistencias excepcionalmente altas. En vista del procesamiento complejo que se requiere para la producción de bigotes, su costo puede ser bastante alto.

Distribución de las fibras Los filamentos excepcionalmente finos se reúnen en forma de hilados, hilos o mechas. En los **hilos** se retuercen hasta 10 000 filamentos para producir la fibra. Una **mecha** contiene desde unos cuantos cientos a más de 100 000 filamentos sin retorcer (figura 17-20). Los **hilados** son paquetes sin retorcer de filamentos, hilos o mechas.

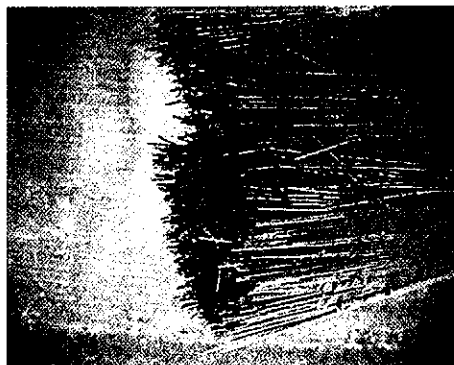


Figura 17-20

Micrografía electrónica de barrido de una mecha de carbono, con muchos filamentos de carbono individuales (200×).

(Reimpresa por cortesía de Don Askeland.)

Frecuentemente, las fibras se cortan en tramos de 1 cm o menores. Estas fibras, conocidas también como **hebras**, son fáciles de incorporar en la matriz y son comunes en los compuestos de moldeo de láminas y de moldeo volumétrico para compuestos de matriz polimérica. Muchas veces, las fibras están presentes dentro del compuesto con una orientación al azar o aleatoria.

Para compuestos de matriz polimérica, se pueden procesar fibras largas o continuas en forma de esteras o de telas. Las *esteras* contienen fibras sin tejer orientadas al azar y sujetas apenas por una resina polimérica. Las fibras también se pueden entamar, trenzar y tejer en tejidos bidimensionales o tridimensionales. Después los tejidos se impregnan con una resina polimérica. En este punto del proceso, las resinas todavía no se han polimerizado por completo; estas esteras o telas se conocen como **preformas**.

Cuando es necesario introducir fibras alineadas unidireccionalmente en una matriz polimérica, se pueden producir **cintas**. Las fibras individuales se pueden desenrollar desde carretes sobre un mandril, que determina el espaciamiento de las fibras individuales e impregnadas y reforzadas con una resina polimérica. Estas cintas, con un grosor de sólo un diámetro de fibra, pueden tener un ancho hasta de 48 pulg. La figura 17-21 ilustra que las cintas también se pueden fabricar cubriendo las fibras con capas superiores e inferiores de hoja metálica que después se juntan por medio de unión por difusión.

Producción del compuesto

Se utiliza una diversidad de métodos para la producción de piezas compuestas, dependiendo de la aplicación y de los materiales. Los compuestos reforzados con fibras cortas se elaboran por lo general mezclando las fibras en una matriz líquida o plástica, y utilizando después técnicas relativamente convencionales, como sería el moldeo por inyección para los compuestos en matriz polimérica o el vaciado para compuestos de matriz metálica. Los compuestos con matriz polimérica también se pueden producir utilizando un método de aspersión, en el cual fibras cortas mezcladas con una resina se rocían contra un molde y después se curan.

Sin embargo, se han diseñado técnicas especiales para la producción de compuestos utilizando fibras continuas, ya sea en una forma alineada en forma unidireccional, en estera o en tejido (figura 17-22). En técnicas de elaboración manual, las cintas, esteras o tejidos se extienden sobre una forma, saturada con resina polimérica, y se presionan para asegurar un buen contacto y una completa eliminación de la porosidad; finalmente se curan. De esta manera se pueden fabricar carrocerías de automóviles o de camiones con fibra de vidrio, lo cual suele ser una operación lenta y que requiere mucha mano de obra.

Las cintas y las telas también se pueden colocar en un dado y pueden formarse mediante el moldeo por bolsa. Se introducen gases a alta presión o se provoca un vacío, para obligar a que las capas individuales se junten de tal manera que durante el curado se obtenga una buena unión. Con estas técnicas, se han fabricado grandes componentes de matriz polimérica para el forro de fuselajes de aviones militares. En el moldeo en matrices macho y hembra, se colocan fibras cortas o esteras en una matriz hecha de dos piezas; al cerrarse ésta, se obtiene la forma deseada.

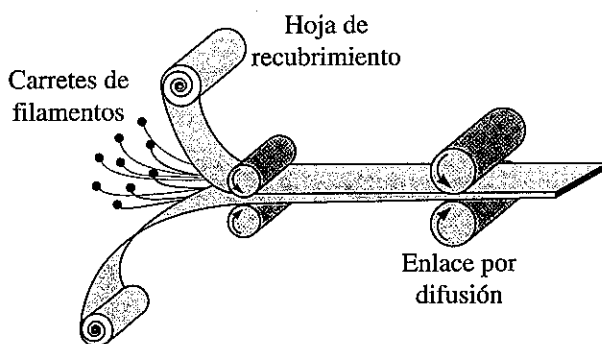


Figura 17-21

Producción de cintas de fibra con encapsulado de fibras entre láminas de metal mediante unión por difusión.

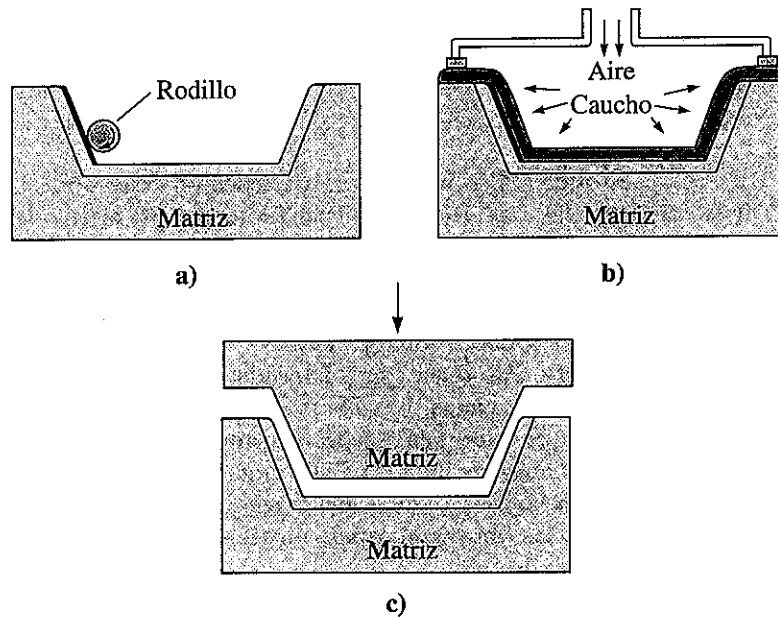


Figura 17-22 Producción de formas de materiales compuestos en matrices a) a mano, b) mediante moldeo a presión y c) por moldeo en matrices macho y hembra.

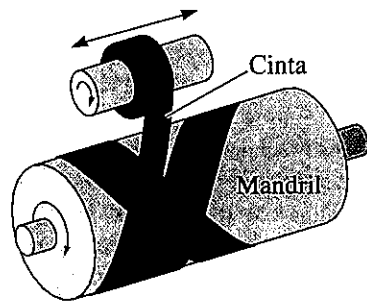


Figura 17-23

Producción de formas de materiales compuestos mediante el enrollado de filamentos.

El **enrollado de filamentos** se utiliza para producir componentes como recipientes a presión y piezas fundidas para motores a reacción (figura 17-23). Las fibras se enrollan alrededor de una forma o de un mandril para formar gradualmente una figura sólida que incluso puede llegar a medir varios pies de espesor. El filamento puede estar sumergido en la resina de la matriz polimérica antes de su enrollado, o esta resina se puede impregnar alrededor del filamento durante o después del enrollado. El curado completa la producción de la pieza.

Se utiliza **extrusión por estirado (pultrusión)** para formar un producto de forma simple con sección transversal uniforme, por ejemplo formas redondas, rectangulares, tuberías, placas

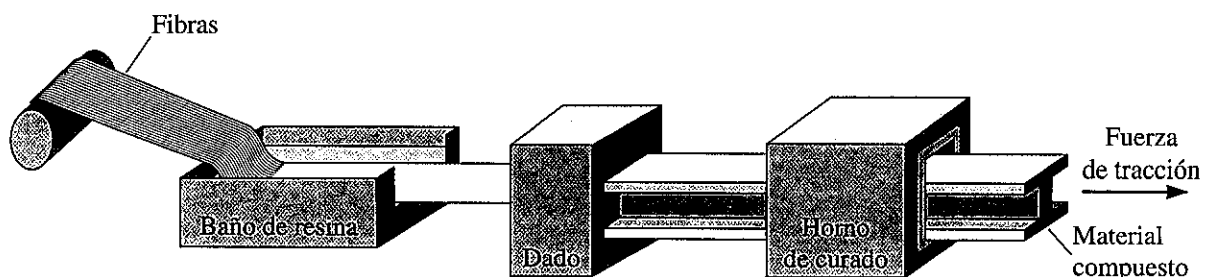


Figura 17-24 Producción de formas de materiales compuestos mediante extrusión por estirado.

o láminas (figura 17-24). Las fibras o las esteras son estiradas desde los carretes, pasadas por un baño de resina polimérica para su impregnación y unidas para producir una forma específica antes de entrar en un dado caliente para su curado. El curado de la resina se efectúa casi de inmediato, por lo que se fabrica un producto en forma continua. El material extruido puede conformarse de modo subsiguiente en formas un tanto más complejas, como cañas de pescar, palos de golf y bastones para esquíes.

Los compuestos de matriz metálica con fibras continuas son más difíciles de producir que los compuestos de resina polimérica. También se pueden utilizar procesos de vaciado o colado que obligan al líquido a pasar alrededor de las fibras por ascensión capilar, colado a presión, infiltración por vacío o colada continua. También es posible utilizar varios procesos de compactación en estado sólido.

17-6 Sistemas reforzados con fibra y sus aplicaciones

Antes de terminar el análisis de los compuestos reforzados con fibras, hay que ver el comportamiento y las aplicaciones de algunos de los más comunes de estos materiales. La figura 17-25 compara el módulo y la resistencia específicos de varios materiales compuestos con los de metales y polímeros. Obsérvese que los valores en esta figura son menores que los que aparecen en la figura 17-14, ya que ahora es material compuesto y no sólo fibra.

Compuestos avanzados Es frecuente que se utilice el término *compuestos avanzados* cuando se pretende que el compuesto dé servicio en aplicaciones de importancia crítica, como sería la industria aeroespacial (tabla 17-3). Los compuestos avanzados son, por lo general, compuestos de matriz polimérica reforzados con un polímero, metal o fibras cerámicas de alta resistencia. Donde se requiera de una rigidez particularmente buena, se hace un uso extenso de las fibras de carbono; las fibras de aramidas y, a un grado todavía mayor, las de polietileno son más adecuadas para aplicaciones de alta resistencia donde la tenacidad y

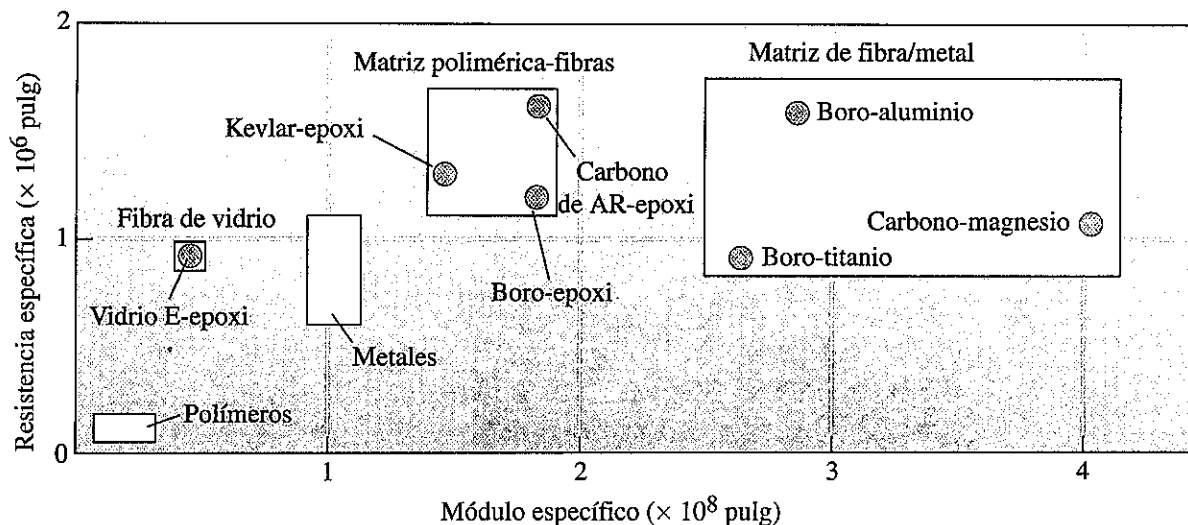


Figura 17-25 Comparación del módulo y la resistencia específicos de varios materiales compuestos, con respecto a los de metales y polímeros.

TABLA 17-3 ■ Ejemplos de materiales reforzados con fibras y sus aplicaciones

Material	Aplicaciones
Aluminio-Borsic	Aspas de ventilador en motores, otras aplicaciones en la industria aérea y aeroespacial
Kevlar™-epoxi y Kevlar™-poliéster	Aplicaciones aéreas y aeroespaciales (incluyendo el Transbordador), cascos para embarcaciones, artículos deportivos (raquetas de tenis, palos de golf, cañas de pescar), chalecos a prueba de balas
Polímero-grafito	Aplicaciones aéreas y automotrices, artículos deportivos
Polímero-vidrio	Aplicaciones automotrices ligeras, marinas y para agua dulce, resistentes a la corrosión, artículos deportivos, componentes para aeronaves y aeroespaciales

resistencia a daños son más importantes. Por desgracia, las fibras poliméricas pierden su resistencia a temperaturas relativamente bajas, como ocurre en todas las matrices poliméricas (figura 17-26).

Los compuestos avanzados también se usan con frecuencia para fabricar artículos deportivos. Muchas veces, las raquetas de tenis, los palos de golf, los esquís, los bastones de esquí y las cañas de pescar contienen fibras de carbono o de aramidas debido a que, con una mayor rigidez, se logra un mejor desempeño. En el caso de los palos de golf, las fibras de carbono hacen posible un menor peso en el vástago, y por tanto, más peso en la cabeza. Para el velamen ligero de yates de competencia, se usan telas reforzadas con fibras de polietileno.

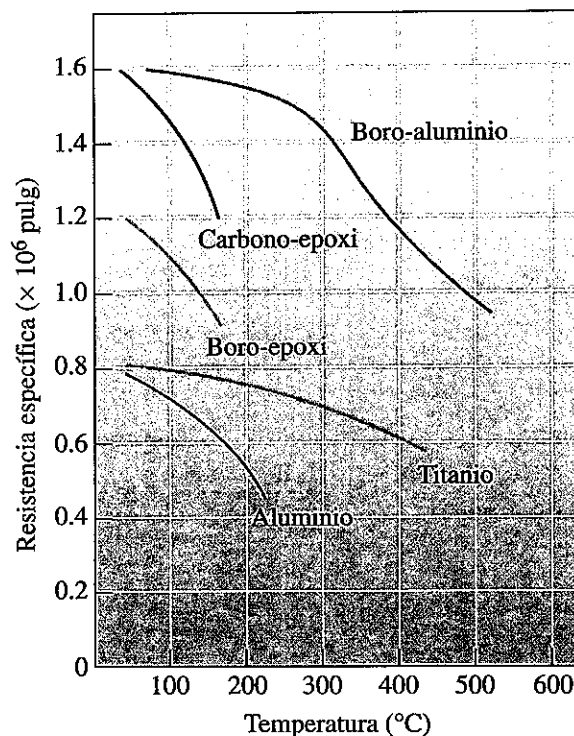


Figura 17-26

Gráfica de resistencia específica contra temperatura, para varios compuestos y metales.

Una aplicación que es única para las fibras de aramidas es el blindaje. Los tenaces compuestos de Kevlar™ proporcionan una mejor protección contra impactos de balas que otros materiales; esto los hace adecuados para ropa ligera, a prueba de balas y flexible.

Los compuestos híbridos están hechos con dos o más tipos de fibras. Por ejemplo, las fibras de Kevlar™ se pueden combinar con fibras de carbono, a fin de mejorar la tenacidad de un compuesto rígido, o bien, se puede mezclar el Kevlar™ con fibras de vidrio para mejorar la rigidez. Controlando las cantidades y la orientación de cada fibra, se puede obtener un ajuste particularmente bueno del compuesto.

También es posible producir compuestos de gran tenacidad, si se tiene cuidado en la selección de los materiales y técnicas de procesamiento. Se puede obtener mejor tenacidad a la fractura en compuestos más bien frágiles utilizando fibras largas, amorfas (como el polietereketona, conocido como PEEK o sulfuro de polifenileno, conocido como PPS), en vez de matrices cristalinas o con enlaces cruzados, matrices elastómeras termoplásticas o polímeros de red interpenetrante.

Compuestos de matriz metálica Estos materiales, endurecidos con fibras metálicas o cerámicas, facilitan una elevada resistencia a altas temperaturas. El aluminio reforzado con fibras de Borsic ha encontrado un extenso uso en aplicaciones aeroespaciales, incluyendo puntales para el transbordador espacial. Ciertas aplicaciones con base en cobre se han reforzado con fibras de SiC para producir hélices de alta resistencia para barcos.

El aluminio se usa comúnmente en los materiales compuestos de matriz metálica. Las fibras de Al_2O_3 refuerzan los pistones de ciertos motores diesel; en aplicaciones aeroespaciales, se usan fibras y bigotes de SiC, incluyendo miembros para mejorar la rigidez y aletas de misiles; y el mástil de la antena de aluminio del telescopio Hubble está reforzado con fibras de carbono. Las fibras poliméricas, debido a sus bajas temperaturas de fusión y de desintegración, por lo general se utilizan en una matriz metálica. Sin embargo, los *polimets* se fabrican extruyendo en caliente polvos de aluminio y polímeros cristalinos líquidos de alta temperatura de fusión. Una reducción de 1000 a 1 durante el proceso de extrusión alarga el polímero formando filamentos alineados y une las partículas de polvo de aluminio en una matriz sólida.

Los compuestos de matriz metálica pueden encontrar aplicaciones importantes en componentes para motores a reacción o para aeronaves. Las superaleaciones reforzadas con fibras metálicas (como el tungsteno) o fibras cerámicas (como el SiC o el B_4N) conservan su resistencia a temperaturas más elevadas, lo que permite que los motores a chorro funcionen con mayor eficiencia. De igual forma, el titanio y los aluminuros de titanio reforzados con fibras de SiC se consideran para la fabricación de álabes y discos para turbinas.

Una aplicación única de los compuestos de matriz metálica es en la fabricación de alambres superconductores requeridos para los reactores de fusión. El compuesto intermetálico Nb_3Sn tiene buenas propiedades superconductoras, pero es muy frágil. Para producir alambre de Nb_3Sn , un alambre de niobio puro se recubre con cobre y de esta manera ambos metales se forman en un compuesto de alambre (figura 17-27). Este compuesto de alambre de niobio y cobre se recubre después con estaño. El estaño se difunde por el cobre y reacciona con el niobio para producir el compuesto intermetálico. También se utilizan sistemas de niobio-titanio.

Compuestos de matriz cerámica Los compuestos que contienen fibras cerámicas en una matriz también cerámica encuentran igualmente muchas aplicaciones. Se analizarán dos usos importantes, a fin de ilustrar las propiedades únicas que se pueden lograr con dichos materiales.

Los compuestos de carbono-carbono (C-C) se utilizan en aplicaciones aeroespaciales debido a su extraordinaria resistencia a la temperatura. Éstos pueden operar a temperaturas de hasta 3000 °C y, de hecho, son más resistentes a altas temperaturas que a bajas (figura 17-28).

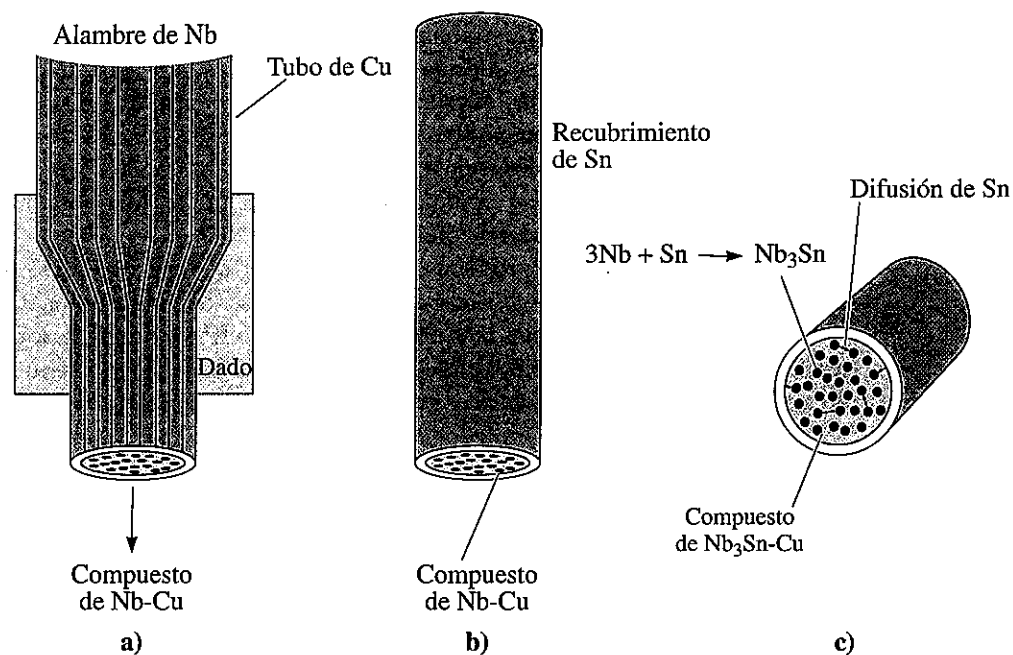


Figura 17-27 Manufactura de alambres superconductores compuestos: a) durante el formado, el alambre de Nb se rodea con Cu. b) Se deposita estaño en el alambre compuesto Nb-Cu. c) El estaño se difunde en el niobio para producir el compuesto $\text{Nb}_3\text{Sn-Cu}$.

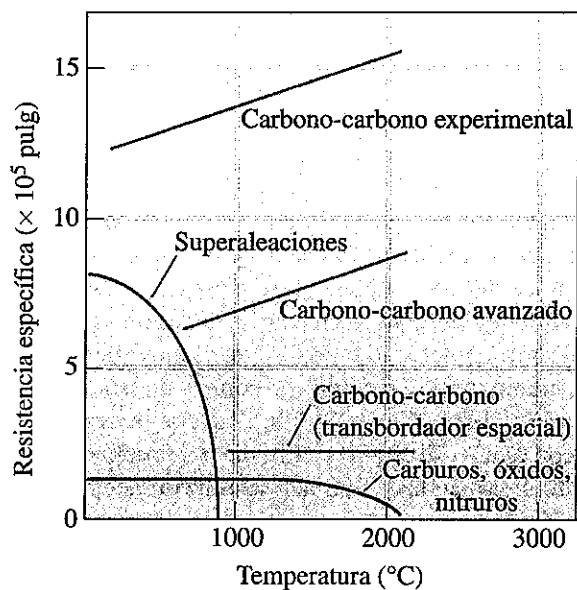


Figura 17-28 Comparación de las resistencias específicas de varios materiales compuestos carbono-carbono, con las de otros materiales para altas temperaturas, en función de la temperatura.

Los compuestos de carbono-carbono se construyen al ajustar un tejido de fibras de poliácridonitrilo o de carbono para que siga la forma de un molde e impregnando después el tejido con una resina orgánica, como una fenólica. La pieza se piroliza para convertir la resina fenólica en carbono. El compuesto, todavía blando y poroso, se impregna y se piroliza varias veces más, incrementando cada vez su densidad, resistencia y rigidez. Finalmente, la pieza se recubre con carburo de silicio a fin de proteger el compuesto carbono-carbono contra la oxidación. Se pueden alcanzar resistencias de 300 000 psi, así como magnitudes de rigidez de 50×10^6 psi. Los compuestos carbono-carbono se han utilizado como conos de nariz y bordes de ataque de vehículos aeroespaciales de alto rendimiento, como el transbordador espacial, así como en discos de frenos de automóviles deportivos y aeronaves comerciales a reacción.

Los compuestos de fibras cerámicas en matriz cerámica logran resistencia y tenacidad a la fractura mejoradas, en comparación con materiales cerámicos convencionales (tabla 17-4). Los refuerzos de fibra mejoran la tenacidad de la matriz cerámica de varias formas. Primero, una grieta que se mueva por la matriz encuentra una fibra: si la unión entre matriz y fibra es mala, la grieta se ve obligada a seguir alrededor de la fibra para continuar el proceso de fractura. Además, una mala unión permite que la fibra empiece a salirse de la matriz [figura 17-29a)]. Ambos procesos consumen energía, aumentando así la tenacidad a la fractura. Finalmente, conforme se inicia una grieta en la matriz, algunas fibras que no estén rotas pueden servir de puente en la grieta, aportando un esfuerzo de compresión que ayuda a que la grieta no se abra [figura 17-29b)].

A diferencia de los compuestos de matriz polimérica y metálica, lo que se requiere es una mala unión, no una buena. En consecuencia, es determinante un buen control de la estructura de la interfaz. En un cerámico vítreo (con base en $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Li}_2\text{O}$) reforzado con fibras de SiC, se produce una capa de interfaz que contiene carbono y NbC, que facilita la separación de la fibra de la matriz. Sin embargo, si el compuesto se calienta a alta temperatura, la interfaz se oxida; el óxido ocupa un volumen considerable, ejerciendo una fuerza de sujeción sobre las fibras, lo que impide una fácil extracción. Entonces disminuye la tenacidad a la fractura. El siguiente ejemplo ilustra algunos de los aspectos del costo y propiedades que se presentan al trabajar con compuestos.

TABLA 17-4 ■ Efecto de las fibras de refuerzo de SiC sobre las propiedades de materiales cerámicos seleccionados

Material	Resistencia a la flexión (psi)	Tenacidad a la fractura (psi $\sqrt{\text{pulg}}$)
Al_2O_3	80 000	5000
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$	115 000	8000
SiC	72 000	4000
SiC/SiC	110 000	23 000
ZrO_2	30 000	5000
ZrO_2/SiC	65 000	20 200
Si_3N_4	68 000	4000
$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$	115 000	51 000
Vidrio	9000	1000
Vidrio/SiC	120 000	17 000
Vidrio cerámico	30 000	2000
Vidrio cerámico/SiC	120 000	16 000



Figura 17-29 Dos modos de falla en materiales compuestos cerámica-cerámica: a) Una excesiva extracción de las fibras de SiC en una matriz de vidrio logra una buena tenacidad para el material compuesto (20 $\times$). (Fuente: *ASM Handbook*, vol. 9, *Metallography and Microstructure* (1985), *ASM International*, *Materials Park, OH 44073-0002*.) b) Puentes de algunas fibras a través de una grieta, que mejoran la tenacidad de un compuesto de matriz cerámica (ampliación desconocida). (Fuente: *Journal of Metals*, mayo de 1991.)

Ejemplo 17-10

Diseñe un puntal de matriz de resina epóxica reforzada unidireccionalmente por fibras de sección transversal redonda. El puntal mide 10 pies de largo y, al aplicar una fuerza de 500 libras, no debe estirarse más de 0.10 pulg. Es necesario asegurarse de que el esfuerzo que actúa sobre el puntal sea inferior a la resistencia a la fluencia de la matriz epóxica: 12 000 psi. En caso de ruptura de las fibras, el puntal se estirará una distancia adicional, pero no debe fracturarse catastróficamente. La resina epóxica tiene un costo aproximado de \$0.80 por libra y un módulo de elasticidad de 500 000 psi.

SOLUCIÓN

Suponga que el puntal se fabrica sólo de material epóxico (es decir, sin fibras):

$$\begin{aligned}\epsilon_{\text{máx}} &= \frac{0.10 \text{ pulg}}{120 \text{ pulg}} = 0.00083 \text{ pulg/pulg} \\ \sigma_{\text{máx}} &= E\epsilon = (500\,000)(0.00083) = 415 \text{ psi} \\ A_{\text{puntal}} &= \frac{F}{\sigma} = \frac{500}{415} = 1.2 \text{ pulg}^2 \text{ o } d = 1.24 \text{ pulg}\end{aligned}$$

$$\text{Dado que } \rho_{\text{epóxico}} = 1.25 \text{ g/cm}^3 = 0.0451 \text{ lb/pulg}^3,$$

$$\text{Peso}_{\text{puntal}} = (0.0451)(\pi)(1.24/2)^2(120) = 6.54 \text{ lb}$$

$$\text{Costo}_{\text{puntal}} = (6.54 \text{ lb})(\$0.80/\text{lb}) = \$5.23$$

Sin ningún refuerzo, el puntal resulta grande y pesado; el costo de los materiales es elevado debido a la gran cantidad de material epóxico necesario.

En un compuesto, la deformación máxima sigue siendo de 0.00083 pulg/pulg. Si se fabrica el puntal lo más pequeño posible, es decir, operando a 12 000 psi, entonces el módulo de elasticidad mínimo E_c del compuesto es:

$$E_c > \frac{\sigma}{\epsilon_{\text{máx}}} = \frac{12\,000}{0.00083} = 14.5 \times 10^6 \text{ psi}$$

Hay varios sistemas de compuestos posibles. El módulo de las fibras de vidrio es inferior a 14.5×10^6 psi; por tanto, un refuerzo de vidrio no es una elección posible.

Para fibras de carbono de alto módulo, $E = 77 \times 10^6$ psi, la densidad es de $1.9 \text{ g/cm}^3 = 0.0686 \text{ lb/pulg}^3$, y el costo es aproximadamente de \$30 por libra. La fracción volumétrica mínima de fibras de carbono requeridas para obtener un módulo para el compuesto de 14.5×10^6 psi es:

$$\begin{aligned}E_c &= f_c(77 \times 10^6) + (1 - f_c)(0.5 \times 10^6) > 14.5 \times 10^6 \\ f_c &= 0.183\end{aligned}$$

La fracción volumétrica de epóxico que resta es 0.817. Una superficie 0.817 veces la sección transversal del puntal debe soportar una carga de 500 lb con no más de 12 000 psi, en caso de que fallaran todas las fibras:

$$A_{\text{epóxico}} = 0.817 A_{\text{total}} = \frac{F}{\sigma} = \frac{500 \text{ lb}}{12\,000 \text{ psi}} = 0.0417 \text{ pulg}^2$$

$$A_{\text{total}} = \frac{0.0417}{0.817} = 0.051 \text{ pulg}^2 \text{ o } d = 0.255 \text{ pulg}$$

$$\text{Volumen}_{\text{puntal}} = (0.051 \text{ pulg}^2)(120 \text{ pulg}) = 6.12 \text{ pulg}^3$$

$$\begin{aligned}\text{Peso}_{\text{puntal}} &= \rho \text{Volumen}_{\text{puntal}} = [(0.0686)(0.183) + (0.0451)(0.817)](6.12) \\ &= 0.302 \text{ lb}\end{aligned}$$

Para calcular la fracción en peso del carbono, considere 1 pulg³ de compuesto. Entonces la fracción en peso del carbono estará dada por

$$\text{Fracción en peso}_{\text{carbono}} = \frac{(0.183 \text{ pulg}^3)(0.0686 \text{ lb/pulg}^3)}{(0.183 \text{ pulg}^3)(0.0686 \text{ lb/pulg}^3) + (0.817 \text{ pulg}^3)(0.0451 \text{ lb/pulg}^3)} = 0.254$$

y el peso total del carbono en el compuesto es

$$\text{Peso}_{\text{carbono}} = (0.254)(0.302 \text{ lb}) = 0.077 \text{ lb}$$

Del mismo modo, la fracción en peso del epóxico se calcula como

$$\text{Fracción en peso}_{\text{epóxico}} = \frac{(0.817 \text{ pulg}^3)(0.0451 \text{ lb/pulg}^3)}{(0.183 \text{ pulg}^3)(0.0686 \text{ lb/pulg}^3) + (0.817 \text{ pulg}^3)(0.0451 \text{ lb/pulg}^3)} = 1 - 0.254 = 0.746$$

y el peso total del epóxico en el compuesto es

$$\text{Peso}_{\text{epóxico}} = (0.746)(0.302 \text{ lb}) = 0.225 \text{ lb}$$

Por tanto,

$$\text{Costo}_{\text{puntal}} = (0.077 \text{ lb})(\$30/\text{lb}) + (0.225 \text{ lb})(\$0.80/\text{lb}) = \$2.49$$

El puntal reforzado con fibras de carbono tiene menos de una cuarta parte del diámetro de una estructura epóxica, con sólo el 5% del peso y la mitad del costo.

También se podrían repetir estos cálculos usando fibras de Kevlar™, que tienen un módulo de 18×10^6 psi, una densidad de $1.44 \text{ g/cm}^3 = 0.052 \text{ lb/pulg}^3$ y un costo de alrededor de \$20 por libra. Si se hace así, se encuentra que se necesita una fracción volumétrica de 0.8 fibras. Tenga en cuenta que 0.8 es la máxima fracción volumétrica que se puede incorporar en una matriz. También se encontrará que el diámetro requerido del puntal es de 0.515 pulg y que pesa 1.263 lb, con un costo de \$20.94. El módulo del Kevlar™ no es lo suficientemente alto como para compensar su alto costo.

A pesar de que las fibras de carbono son las más costosas, permiten la fabricación del puntal más ligero y el de menor costo de materiales. (Sin embargo, este cálculo no toma en consideración el costo de fabricación de la pieza.) El diseño, por tanto, es usar un puntal de 0.255 pulg de diámetro con una fracción volumétrica de 0.183 de fibras de carbono de alto módulo.

17-7

Materiales compuestos laminares

Los compuestos laminares comprenden recubrimientos muy delgados, superficies protectoras más gruesas, revestimientos, chapados bimetalicos, laminados y todo un conjunto de otras aplicaciones. Además, también es posible considerar como parcialmente laminares a los compuestos reforzados con fibra producidos en forma de cintas o de tejidos. Muchos de ellos están diseñados para mejorar la resistencia a la corrosión, a la vez que mantienen un bajo costo, una elevada resistencia o un peso ligero. Otras características importantes son una resistencia superior al desgaste o a la abrasión, una mejor apariencia y una expansión térmica fuera de lo común.

Regla de las mezclas Algunas de las propiedades de los compuestos laminares paralelas a las laminillas se estiman a partir de la regla de las mezclas. La densidad, la conductividad eléctrica y térmica, así como los módulos de elasticidad en dirección paralela a las laminillas se pueden calcular con un error insignificante utilizando la fórmula siguiente:

$$\text{Densidad} = \rho_{c,\parallel} = \sum (f_i \rho_i) \quad (17-13)$$

$$\text{Conductividad eléctrica} = \sigma_{c,\parallel} = \sum (f_i \sigma_i)$$

$$\text{Conductividad térmica} = k_{c,\parallel} = \sum (f_i k_i) \quad (17-14)$$

$$\text{Módulo de elasticidad} = E_{c,\parallel} = \sum (f_i E_i)$$

Los compuestos laminares son altamente anisotrópicos. Las propiedades en dirección perpendicular a las laminillas son:

$$\text{Conductividad eléctrica} = \frac{1}{\sigma_{c,\perp}} = \sum \left(\frac{f_i}{\sigma_i} \right)$$

$$\text{Conductividad térmica} = \frac{1}{k_{c,\perp}} = \sum \left(\frac{f_i}{k_i} \right) \quad (17.15)$$

$$\text{Módulo de elasticidad} = \frac{1}{E_{c,\perp}} = \sum \left(\frac{f_i}{E_i} \right)$$

Muchas otras propiedades, como la resistencia a la corrosión y al desgaste, dependen principalmente de sólo uno de los componentes del compuesto, de modo que la regla de las mezclas no es aplicable.

Producción de compuestos laminares Para producir compuestos laminares se usan varios métodos, incluyendo una diversidad de técnicas de deformación y de unión que se utilizan principalmente para los metales (figura 17-30).

Con frecuencia, cada una de las capas se une a las adyacentes mediante una *unión adhesiva*, como en la fabricación del triplay o madera contrachapada. Los compuestos de matriz polimérica hechos a partir de varias capas de fibras de preformas de tejido o de cinta

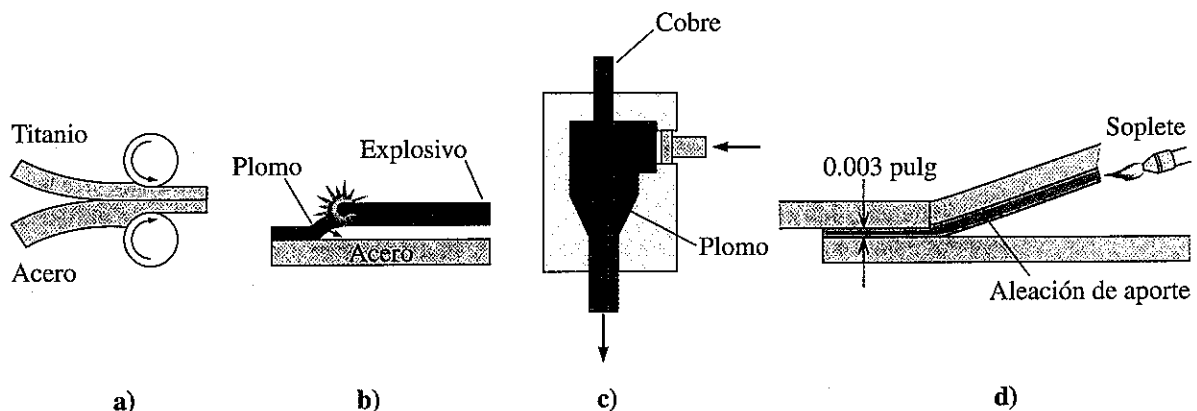


Figura 17-30 Técnicas para producir compuestos laminares: a) unión por laminación, b) unión por explosión, c) coextrusión y d) soldadura con aporte.

también se unen usando adhesivos; se coloca una película delgada de material no polimerizado entre cada capa de la preforma. Cuando estas capas se presionan unas contra otras a temperaturas elevadas, se completa la polimerización y las fibras de la preforma quedan unidas para producir compuestos que llegan a tener docenas de capas de espesor.

La mayor parte de los compuestos laminares metálicos, como revestimientos y bimetálicos, se producen por *unión por deformación*, como unión con rodillo caliente o frío. La presión que ejercen los rodillos rompe la película de óxido de la superficie, lo que pone a las dos superficies en contacto atómico y permite que se unan. También se puede utilizar unión por explosión. Una carga explosiva proporciona la presión necesaria para la unión de los metales. Este proceso es particularmente adecuado para unir placas muy grandes que no se puedan introducir en un tren de laminación. Los compuestos laminares muy simples, como el cable coaxial, se fabrican coextruyendo dos materiales a través de un dado, de tal forma que el material blando rodee al más duro. El alambre conductor metálico puede recubrirse de esta manera con un polímero termoplástico aislante.

La **soldadura fuerte** puede unir placas de compuestos (capítulo 9). Las hojas metálicas, separadas por un espacio muy pequeño, de preferencia de aproximadamente 0.003 pulg, se calientan por encima de la temperatura de fusión de la aleación de aporte. La aleación de aporte fundida es atraída hacia la unión mediante acción capilar.

17-8

Ejemplos y aplicaciones de compuestos laminares

La cantidad de compuestos laminares es tan variada y sus aplicaciones y objetivos tan numerosos, que no es posible efectuar generalizaciones con respecto a su comportamiento. En cambio, se examinarán las características de unos cuantos ejemplos de uso común.

Laminados Los laminados son capas de materiales unidas por un adhesivo orgánico. En el vidrio de seguridad laminado, dos piezas de vidrio se unen mediante un adhesivo plástico como el polivinilo butiral (PVB); el adhesivo impide que los fragmentos de vidrio salgan disparados al romperse la pieza (capítulo 15). Los laminados se utilizan como aislamiento en motores, para engranes, tarjetas de circuitos impresos y elementos decorativos, como son las cubiertas de Formica® y otros muebles.

Los *microlaminados* incluyen materiales compuestos formados por capas alternas de hojas de aluminio y de polímero reforzado con fibras. El *Arall* (laminado de aluminio y aramidas) y el *Glare* (laminado de aluminio y vidrio) son dos ejemplos. En el Arall se prepara una fibra de aramidas, como el Kevlar™, como un tejido o como una cinta unidireccional, se impregna con un adhesivo y se lamina entre capas de una aleación de aluminio (figura 17-31). El laminado compuesto tiene una combinación poco común de resistencia, rigidez, resistencia a la corrosión y poco peso. La resistencia a la fatiga se mejora, ya que la interfaz entre las capas puede detener las grietas. El Glare tiene propiedades semejantes y se emplea en el fuselaje del Airbus 380. En comparación con compuestos de matriz polimérica, los microlaminados tienen una buena resistencia a daños por descargas eléctricas (lo cual es importante en aplicaciones aeroespaciales), son fáciles de conformar, de maquinar y de reparar.

Metales revestidos Son compuestos de metal con metal. Un ejemplo común del **revestimiento** son las monedas plateadas de Estados Unidos. Una aleación de Cu-80% de Ni se une en ambas caras de una aleación Cu-20% Ni. La relación de espesores es de aproximadamente 1/6:2/3:1/6. La aleación de alto nivel de níquel tiene un color plateado, en tanto que el núcleo, donde predomina el cobre, tiene un bajo costo.

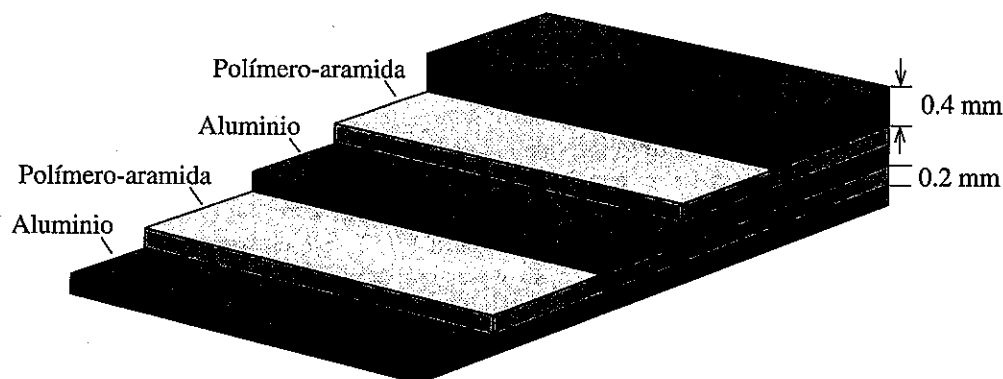


Figura 17-31 Diagrama esquemático de un laminado de aluminio-aramida, el Arall, que tiene potencial para aplicaciones aeroespaciales.

Los materiales revestidos presentan una combinación de buena resistencia a la corrosión con alta resistencia. El *Alclad* es un compuesto revestido en el cual se une aluminio comercialmente puro con aleaciones de aluminio de más alta resistencia. El aluminio puro protege contra la corrosión a la aleación de mayor resistencia. El espesor de la capa de aluminio puro es de entre 1 y 15% del espesor total. El Alclad se utiliza en la construcción de aeronaves, intercambiadores de calor, elementos de construcción de edificios y tanques de almacenamiento, donde se desee tener una buena combinación de resistencia, resistencia a la corrosión y bajo peso.

Bimetálicos Los indicadores y controladores de temperatura aprovechan los diferentes coeficientes de expansión térmica de dos metales distintos en un compuesto laminar. Si se calientan las dos piezas de metal, el metal que tenga un coeficiente de expansión térmica más elevado se alargará más. Si ambas piezas están rígidamente unidas entre sí, la diferencia de sus coeficientes hará que la tira metálica se tuerza, produciendo una superficie curva. La cantidad de movimiento depende de la temperatura. Al medir la curvatura o la deflexión de la tira, es posible determinar dicha temperatura. De igual forma, si el extremo libre de la tira activa un relevador, ésta puede servir para conectar o desconectar un calentador o un equipo acondicionador de aire, a fin de regular la temperatura. Los metales que se seleccionan para los **bimetálicos** deben tener a) coeficientes de expansión térmica muy distintos, b) características de expansión reversibles y repetibles y c) un alto módulo de elasticidad para realizar un trabajo. Es frecuente que la tira de baja expansión se haga de Invar, una aleación de hierro-níquel, en tanto que la tira de alta expansión puede fabricarse de latón, Monel o níquel puro.

Los bimetálicos pueden actuar como interruptores, así como termostatos; si la corriente que pasa por la tira es demasiado elevada, el calentamiento hará que se flexione el bimetálico y se abra el circuito.

Capacitores de multicapas Para la fabricación de millones de capacitores de multicapas, se utiliza una geometría laminar. Su estructura está formada por hojas muy delgadas de un material cerámico basado en el BaTiO_3 separadas por electrodos Ag/Pd o Ni (capítulo 19).

17-9 Estructuras tipo emparedado

Los materiales tipo **emparedado** (o **intercalados**) tienen capas delgadas de material de recubrimiento unidas a un material de relleno ligero, como una espuma de polímero. Ni el relleno ni

el material de recubrimiento son materiales rígidos o resistentes, pero el compuesto sí tiene ambas propiedades. Un ejemplo conocido son las láminas de cartón acanalado, en las que un núcleo de papel se une por ambos lados a un papel liso y grueso. Ni el núcleo acanalado o corrugado ni el papel de recubrimiento son rígidos, pero la combinación sí lo es.

Otro ejemplo importante es la estructura de panal utilizada en aplicaciones aeronavales. Se produce un **panal** pegando una tira delgada de aluminio en lugares seleccionados. El material del panal se expande después para producir un panel celular de muy baja densidad que, por sí mismo, es inestable (figura 17-32). Sin embargo, si a ambos lados del panel se le adhieren hojas de aluminio, se obtiene un emparedado excepcionalmente ligero, muy rígido y fuerte, con una densidad de hasta 0.04 g/cm^3 .

Las celdas del panal tienen una diversidad de formas hexagonales, cuadradas, rectangulares o senoidales y se pueden fabricar de aluminio, fibra de vidrio, papel, polímeros de aramidas y otros materiales. Las celdas de panal se pueden rellenar con espuma o fibra de vidrio para lograr una excelente absorción de sonidos y vibraciones. La figura 17-33 describe un método con el que se puede fabricar el panal.

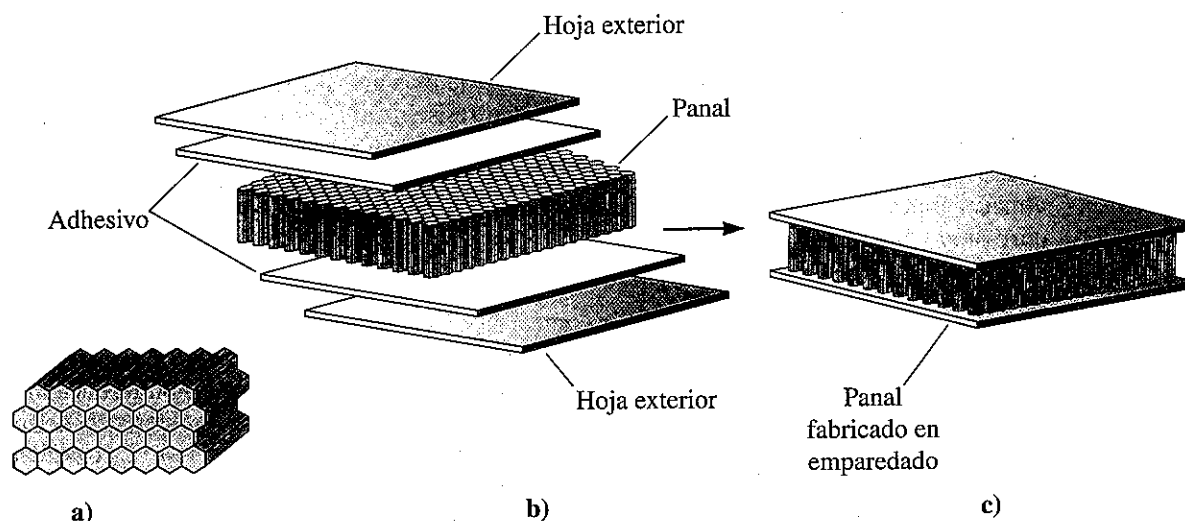


Figura 17-32 a) Núcleo en forma de panal de celdas hexagonales, b) que se puede unir a dos hojas mediante capas de adhesivo y que c) puede producir una estructura de emparedado excepcionalmente ligera, aunque rígida y fuerte.

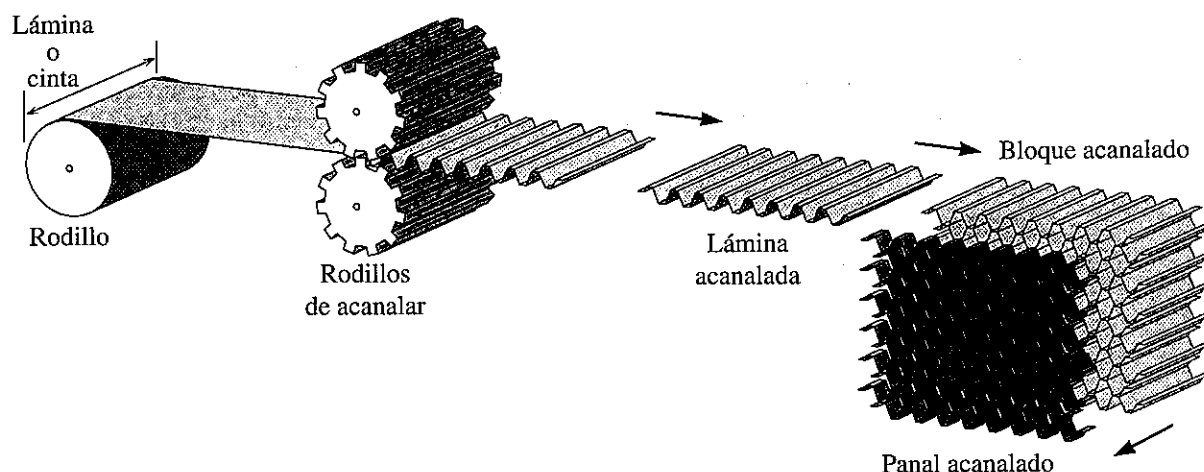


Figura 17-33 En el método de acanalado para producir un núcleo en panal, el material (aluminio, por ejemplo) es acanalado por dos rodillos. Las hojas acanaladas se unen entre sí con un adhesivo y después se cortan al espesor deseado.

Resumen

- Los compuestos están formados por dos o más materiales o fases unidas o conectadas para obtener una combinación de propiedades que no se podrían lograr de otra manera. Para la determinación de las propiedades es muy importante la fracción volumétrica y la conectividad de fases o de materiales, en un compuesto, así como la naturaleza de la interfaz entre la fase dispersa y la matriz.
- Cualquier combinación de metales, polímeros y materiales cerámicos es prácticamente posible. En muchos casos, es posible utilizar la regla de las mezclas para estimar las propiedades del compuesto.
- Los compuestos tienen numerosas aplicaciones en la industria de la construcción, aeroespacial, automotriz, deportiva, microelectrónica y otras industrias.
- Los materiales endurecidos por dispersión contienen partículas de óxido en una matriz metálica. Los pequeños dispersoides estables interfieren con el deslizamiento, dándole buenas propiedades mecánicas a altas temperaturas.
- Los compuestos particulados contienen partículas que imparten combinaciones de propiedades al compuesto. Los compuestos de matriz metálica contienen partículas cerámicas o metálicas, que proporcionan una mejor resistencia, y resisten al desgaste y aseguran buena conductividad eléctrica, tenacidad y resistencia a la corrosión. Los compuestos de matriz polimérica contienen partículas que aumentan la rigidez, la resistencia a la temperatura o la conductividad eléctrica, al mismo tiempo que mantienen un bajo peso, facilidad de fabricación o un bajo costo.
- Los compuestos reforzados con fibras proporcionan mejoras en resistencia, rigidez o desempeño a altas temperaturas en metales y en polímeros, así como la tenacidad de los materiales cerámicos. Las fibras, por lo común, son de baja densidad, lo cual les da una resistencia y un módulo específico elevados, pero suelen ser muy frágiles. Las fibras pueden ser continuas o discontinuas; las discontinuas con una proporción dimensional l/d elevada producen un mejor refuerzo.
- Las fibras se introducen en una matriz con una diversidad de orientaciones. Las orientaciones aleatorias y un comportamiento isotrópico se obtienen utilizando fibras discontinuas; las fibras alineadas unidireccionalmente producen compuestos con un comportamiento anisotrópico, con grandes mejoras en la resistencia y rigidez en la dirección paralela a las fibras. Para cumplir con las cargas impuestas, se pueden ajustar las propiedades orientando las fibras en muchas direcciones.
- Los compuestos laminares están hechos de capas de materiales diferentes. Estas capas pueden ser hojas de distintos metales; uno de ellos aportará la resistencia y el otro la dureza o la resistencia a la corrosión. Las capas también pueden incluir hojas de materiales reforzados con fibras unidas a hojas metálicas o poliméricas, o incluso a hojas reforzadas con fibras con orientaciones diferentes. Los compuestos laminares son siempre anisotrópicos.
- Los materiales tipo emparedado, incluyendo los panales, son compuestos laminares excepcionalmente ligeros, con caras sólidas unidas a un núcleo prácticamente hueco.

Glosario

Bigotes Fibras muy delgadas que han crecido de tal forma que producen cristales individuales sin dislocaciones móviles, lo que da resistencias cercanas a las teóricas.

Bimetálico Compuesto laminar que se produce uniendo dos tiras de metal, cada una con diferentes coeficientes de expansión, lo que hace al compuesto sensible a cambios de temperatura.

Carbonización Eliminación de los átomos distintos del carbono de una fibra polimérica, lo que produce una fibra de carbono de alta resistencia. También se conoce como pirolización.

Carburos cementados Compuestos particulados que contienen partículas cerámicas duras unidas en una matriz metálica blanda. El compuesto combina una elevada dureza con una alta capacidad de corte, conservando también una buena resistencia al impacto.

Cintas Una cinta de material preformado de un solo filamento de grosor. Los filamentos pueden ser unidireccionales o tejidos. Se pueden unir varias capas de cintas para producir estructuras compuestas.

Compuestos híbridos orgánicos-inorgánicos Nanocompuestos de estructuras que son en parte orgánicos y en parte inorgánicos, hechos a veces usando el procesamiento de sol-gel.

Delaminación Separación de las capas individuales de un compuesto reforzado con fibras.

Deposición química de vapor [DQV] Método de manufactura de materiales consistente en condensar el material en estado de vapor en un sustrato sólido.

Dispersoides Pequeñas partículas de óxido que se forman en una matriz metálica y que interfieren con los movimientos de dislocación, aportando endurecimiento incluso a elevadas temperaturas.

Emparedado Compuesto elaborado con un material ligero de baja densidad rodeado por capas densas sólidas. El emparedado combina un peso ligero general con una excelente rigidez.

Enrollado de filamentos Proceso para la producción de compuestos reforzados con fibras, en el que se enrollan fibras continuas alrededor de una forma o de un mandril. Las fibras pueden estar en preforma o la estructura con el filamento enrollado se puede impregnar para completar la producción del material compuesto.

Extrusión por estirado Método para producir compuestos que contengan esteras o fibras continuas.

Fase dispersa Fase o fases que se han dispersado en una matriz continua del compuesto.

Fase matriz Fase continua dentro de un compuesto. Los compuestos se identifican según la fase continua (por ejemplo, compuestos de matriz polimérica).

Fibras de aramidas Fibras poliméricas como el KevlarTM formadas a partir de poliamidas, las cuales contienen un anillo de benceno en la estructura del polímero.

Hebras Fibras cortadas en trozos pequeños.

Hilados Paquetes de filamentos, hilos o mechas no retorcidos.

Hilos Fibras continuas producidas a partir de un grupo de filamentos retorcidos.

Mechas Paquete de filamentos no torcidos.

Módulo específico Módulo de elasticidad dividido entre la densidad.

Nanocompuesto Material en el que la fase dispersa es del orden de nanómetros y está distribuida en la matriz continua.

Panal Ensamble ligero pero rígido de una tira de aluminio unida y expandida para formar el núcleo de una estructura de tipo emparedado.

Precursor Producto químico iniciador (por ejemplo una fibra polimérica) que se carboniza para la producción de fibras de carbono.

Preformas Capas de fibras en resinas no polimerizadas. Después de que los materiales de preforma se apilan para formar una estructura descada, la polimerización une las capas.

Proporción dimensional Longitud de una fibra dividida entre su diámetro.

Recubierta Recubrimiento de fibras de vidrio con un material orgánico para mejorar la unión y resistencia a la humedad en fibras de vidrio.

Regla de las mezclas Enunciado que afirma que las propiedades de un compuesto son función de la fracción volumétrica de cada uno de los materiales dentro del compuesto.

Resistencia específica Resistencia a la tensión o a la fluencia de un material dividida entre la densidad.

Revestimiento Compuesto laminar que se produce cuando una capa resistente a la corrosión, o de alta dureza, de un compuesto laminar se forma sobre un respaldo de menor costo o de una resistencia más elevada.

Soldadura fuerte Proceso en el que un metal líquido de relleno se introduce por acción capilar entre dos materiales de base sólida que deben unirse. La unión se obtiene al solidificarse la aleación de aporte.

Problemas

Sección 17-1 Materiales compuestos endurecidos por dispersión

- 17-1** ¿Qué es un compuesto?
- 17-2** ¿De qué dependen las propiedades de los materiales compuestos?
- 17-3** Dé ejemplos de aplicaciones donde los compuestos se usan para soportar cargas.
- 17-4** Dé dos ejemplos de aplicaciones donde los compuestos se usan para aplicaciones no estructurales.
- 17-5** ¿Qué es un compuesto endurecido por dispersión? ¿En qué se diferencia de un compuesto reforzado con partículas?
- 17-6** ¿Qué es un nanocompuesto? ¿Cómo es posible describir como compuestos a los aceros que contengan ferrita y martensita? Explique.
- 17-7** Una matriz de tungsteno con 20% de porosidad está infiltrada con plata. Suponiendo que los poros están interconectados, ¿cuál es la densidad del compuesto antes y después de la infiltración con plata? La densidad del tungsteno puro es de 19.25 g/cm^3 y la de la plata pura es de 10.49 g/cm^3 .
- 17-8** Níquel con 2% en peso de torio se prepara en polvo, se consolida formando una pieza y se sinteriza en presencia de oxígeno, para que todo el torio genere esferas de ThO_2 de 80 nm de diámetro. Calcule el número de esferas por cm^3 . La densidad del ThO_2 es de 9.69 g/cm^3 .
- 17-9** Para crear una capa delgada de óxido, se trata un polvo de aluminio esférico (PAS) de 0.002 mm de diámetro, que después se utiliza para producir un material PAS endurecido por dispersión con 10% vol de Al_2O_3 . Calcule el grosor promedio de la película de óxido antes de la compactación y sinterizado de los polvos de la pieza.
- 17-10** Mediante oxidación interna, se introducen en el tungsteno partículas de itria (Y_2O_3) de 750 Å de diámetro. Mediciones hechas utilizando un microscopio electrónico muestran que hay 5×10^{14} partículas de óxido por cm^3 . Calcule el porcentaje en peso del Y que existía originalmente en la aleación. La densidad de la Y_2O_3 es de 5.01 g/cm^3 .
- 17-11** Sin tratamiento especial, se encuentra que el aluminio tiene comúnmente una capa de Al_2O_3 de 3 nm de grosor. Si el polvo de aluminio esférico preparado con un diámetro

total de 0.01 mm se utiliza para producir el material PAS endurecido por dispersión, calcule el porcentaje volumétrico de Al_2O_3 en el material y en la cantidad de partículas de óxido por cm^3 . Suponga que el óxido se rompe en escamas en forma de disco de 3 nm de grosor y 3×10^{-4} mm de diámetro. Compare el número de partículas de óxido por cm^3 con el de los átomos de solución sólida por cm^3 , cuando al aluminio se le agrega un 3% en peso de un elemento de aleación.

Sección 17-2 Compuestos particulados

- 17-12** ¿Qué es un compuesto particulado?
- 17-13** ¿Qué es un cermet? ¿Cuál es el papel del WC y Co en un cermet?
- 17-14** Calcule la densidad de un carburo cementado, es decir, de un cermet, con base en una matriz de titanio si el compuesto contiene 50% en peso de WC, 22% en peso de TaC y 14% en peso de TiC. (Véase el ejemplo 17-2 para obtener las densidades de los carburos.)
- 17-15** Al caucho vulcanizado para neumáticos se agregan partículas esféricas de sílice (100 nm de diámetro) para mejorar su rigidez. Si la densidad de la matriz de caucho vulcanizado es de 1.1 g/cm^3 , la densidad de la sílice es de 2.5 g/cm^3 y el neumático tiene una porosidad de 4.5%, calcule el número de partículas de sílice perdidas cuando un neumático se desgasta hasta llegar a 0.4 cm de grosor. La densidad del neumático es de 1.2 g/cm^3 , el diámetro total del neumático es de 63 cm; y mide 10 cm de ancho.
- 17-16** Una rueda de esmeril común mide 9 pulg de diámetro, 1 pulg de grueso y pesa 6 libras. La rueda contiene SiC (densidad de 3.2 g/cm^3) unido por vidrio de sílice (densidad de 2.5 g/cm^3); 5% vol de la rueda es poroso. El SiC está en forma de cubos de 0.04 por lado. Calcule
- la fracción volumétrica de partículas de SiC en la rueda y
 - la cantidad de partículas de SiC que se han perdido de la rueda cuando ésta se ha desgastado a un diámetro de 8 pulg.
- 17-17** Se produce material para un receptáculo eléctrico infiltrando cobre en un compacto poroso de carburo de tungsteno (WC). La

densidad del compuesto es de 12.3 g/cm^3 . Suponiendo que se llenan con cobre todos los poros, calcule

- la fracción volumétrica de cobre en el compuesto,
- la fracción volumétrica de poros en el material compacto de WC antes de la infiltración y
- la densidad original del compacto de WC antes de la infiltración.

17-18 Se produce un material para receptáculos eléctricos elaborando primero una pieza compacta de tungsteno poroso que pesa 125 g. Se introduce plata líquida en el compacto; una medición cuidadosa indica que se han infiltrado 105 g de plata. La densidad final del compuesto es de 13.8 g/cm^3 . Calcule la fracción volumétrica del material compacto original que corresponde a porosidad interconectada, así como la fracción volumétrica de la porosidad cerrada (sin infiltración de plata).

17-19 ¿Cuánta arcilla deberá agregarse a 10 kg de polietileno para producir un compuesto de bajo costo, con un módulo de elasticidad superior a 120 000 psi y una resistencia a la tensión mayor a 2000 psi? La densidad de la arcilla es de 2.4 g/cm^3 y la del polietileno es de 0.92 g/cm^3 (véase la figura 17-6).

17-20 Se desea producir un componente de resina epóxica ligero para proporcionar aislamiento térmico. Hay disponibles cuentas o esferas huecas de vidrio con un diámetro exterior de $1/16$ de pulg y con paredes de un grosor de 0.001 pulg. Determine el peso y el número de cuentas que deben agregarse a la resina epóxica, para producir un compuesto de una libra con una densidad de 0.65 g/cm^3 . La densidad del vidrio es de 2.5 g/cm^3 y la epóxica es de 1.25 g/cm^3 .

Sección 17-3 Compuestos reforzados con fibras

Sección 17-4 Características de compuestos reforzados con fibras

17-21 ¿Qué es un compuesto reforzado con fibras?

17-22 ¿Qué materiales para refuerzo con fibras son de uso común?

17-23 En un compuesto reforzado por fibras, ¿cuál es el papel de la matriz?

17-24 ¿Qué significan los términos PRFC y PRFV?

17-25 Explique brevemente en qué forma los volúmenes de fibra, orientación y resistencia de la misma, así como su módulo, afectan las propiedades de los compuestos reforzados con fibras.

17-26 Cinco kilogramos de fibras continuas de boro se introducen en una orientación unidireccional en 8 kg de una matriz de aluminio. Calcule

- la densidad del compuesto,
- el módulo de elasticidad en dirección paralela a las fibras y
- el módulo de elasticidad en dirección perpendicular a las fibras.

17-27 Se desea producir 10 libras de un compuesto continuo y unidireccional reforzado con fibras, de carbono HS, en una matriz poliimida que tiene un módulo de elasticidad de al menos 25×10^6 psi paralelo a las fibras. ¿Cuántas libras de fibras son necesarias? Véase en el capítulo 16 las propiedades de la poliimida.

17-28 Nanotubos de carbono (NTC) con bajo peso (densidad = 1.3 g/cm^3), alta resistencia a la tensión (50 GPa), y módulo de elasticidad (1 TPa) en la dirección axial, han sido publicitados como el material más fuerte descubierto hasta ahora. Calcule la resistencia específica de los NTC. ¿Cómo se compara este valor con el de los bigotes de grafito dados en la tabla 17-2? Si un compuesto se elaboró usando una matriz de alúmina (Al_2O_3) con 1% vol de fibras de NTC, ¿qué fracción de la carga soportarían las fibras de NTC? En la práctica, los compuestos NTC de matriz cerámica no exhiben la esperada mejoría en propiedades mecánicas. ¿Cuáles podrían ser algunas posibles razones de esto?

17-29 Una matriz epóxica está reforzada con 40% vol de fibras de vidrio E, para producir un compuesto de 2 centímetros de diámetro que ha de soportar una carga de 25 000 N aplicada en forma paralela a la longitud de la fibra. Calcule el esfuerzo que actúa en cada fibra. El módulo elástico de la matriz epóxica es de 0.4×10^6 psi.

17-30 Para fabricar una pieza de 1000 libras para un vehículo espacial tripulado, se utiliza una aleación de titanio con un módulo de elasticidad de 16×10^6 psi. Determine el peso de una pieza que tenga el mismo módulo de elasticidad en dirección paralela a las fibras, si la pieza se fabrica de

- aluminio reforzado con fibras de boro y
- poliéster (con módulo de 650 000 psi) reforzado con fibras de carbono de alto módulo.
- Compare el módulo específico de los tres materiales.

17-31 En una matriz de nylon 6,6 se introducen fibras cortas, pero alineadas, de Al_2O_3 con un diámetro de $20 \mu\text{m}$. La resistencia de la unión entre fibras y matriz se estima en 1000 psi. Calcule la longitud crítica de las fibras y compárela con el caso donde se usan bigotes de alúmina de $1 \mu\text{m}$, en lugar de las fibras más gruesas. ¿Cuál es la proporción dimensional mínima para cada uno de los casos?

17-32 Se preparan varios compuestos de matriz epóxica utilizando diferentes longitudes de fibras de ZrO_2 de $3 \mu\text{m}$ de diámetro, y se encuentra que la resistencia del compuesto aumenta al incrementarse la longitud de las fibras hasta 5 mm. En fibras más largas, la resistencia se mantiene prácticamente sin cambio. Estime la resistencia de la unión entre las fibras y la matriz.

17-33 En una matriz de nylon 6,6 se introducen fibras de vidrio con diámetro de $50 \mu\text{m}$. Determine la longitud crítica de fibras a la que la fibra se comporta como si fuera continua. La resistencia de la unión entre las fibras y la matriz es de 10 MPa. Las propiedades materiales relevantes son como sigue:

$$E_{\text{vidrio}} = 72 \text{ GPa}, E_{\text{nylon}} = 2.75 \text{ GPa},$$

$$TS_{\text{vidrio}} = 3.4 \text{ GPa y } TS_{\text{nylon}} = 827 \text{ MPa}.$$

17-34 Un alambre bimetalico de cobre-plata, de 1 cm de diámetro, se prepara por medio de coextrusión con cobre como núcleo y plata como capa exterior. Las propiedades deseadas a lo largo del eje paralelo a la longitud del alambre bimetalico son como sigue:

- Conductividad térmica $> 410 \text{ W/(m-K)}$;
- Conductividad eléctrica $> 60 \times 10^6 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$, y
- Peso $< 750 \text{ g/m}$.

Determine el intervalo permitido del diámetro del núcleo de cobre.

	Cobre	Plata
Densidad (g/cm^3)	8.96	10.49
Conductividad eléctrica ($\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$)	59×10^6	63×10^6
Conductividad térmica [W/(m-K)]	401	429

17-35 ¿Qué es un agente de acoplamiento? ¿Qué es "recubierta" en cuanto a la producción de fibras de vidrio se refiere?

Sección 17-5 Manufactura de fibras y compuestos

17-36 Explique brevemente el método de fabricación de las fibras de boro y de carbono.

17-37 Explique brevemente cómo se fabrican las fibras de vidrio continuas.

17-38 ¿Cuál es la diferencia entre una fibra y un bigote?

17-39 En un compuesto de matriz polimérica se introducen directamente fibras de vidrio discontinuas, como fueron elaboradas, en la matriz; en un segundo caso, las fibras son previamente "recubiertas". Analice el efecto que podría tener esta diferencia sobre la longitud crítica de la fibra, así como sobre la resistencia del compuesto.

17-40 Explique la razón por la cual sería excelente la unión entre fibras de carbono y una matriz epóxica, en tanto que la unión entre las fibras de nitruro de silicio y una matriz de carburo de silicio sería mala.

17-41 Una matriz de poliimida ha de ser reforzada con 70% vol de fibras de carbono, para obtener un módulo de elasticidad mínimo de 40×10^6 psi. Recomiende un proceso para la producción de las fibras de carbono requeridas. Estime la resistencia a la tensión de las fibras que se producen.

Sección 17-6 Sistemas reforzados con fibra y sus aplicaciones

- 17-42** Explique brevemente en qué artículos deportivos se utilizan compuestos. ¿Cuál es la razón principal para el uso de estos compuestos en estas aplicaciones?
- 17-43** ¿Cuáles son las ventajas de utilizar compuestos de matriz cerámica?

Sección 17-7 Materiales compuestos laminares

Sección 17-8 Ejemplos y aplicaciones de compuestos laminares

Sección 17-9 Estructuras tipo emparedado

- 17-44** ¿Qué es un compuesto laminar?
- 17-45** Un microlaminado, el Arall, se produce usando cinco hojas de aluminio de 0.4 mm de espesor y cuatro hojas epóxicas de 0.2 mm de espesor, reforzadas con fibras de Kevlar™ alineadas en forma unidireccional. La fracción volumétrica de las fibras de Kevlar™ en estas hojas intermedias es de 55%. Calcule el módulo de elasticidad del microlaminado, en direcciones paralela y perpendicular a las fibras de Kevlar™ alineadas unidireccionalmente. ¿Cuáles son las ventajas principales del material Arall en comparación con las del aluminio sin reforzar?
- 17-46** Como material aislante, se produce un laminado compuesto de aluminio de 0.1 mm de espesor, emparedado alrededor de una capa de 2 cm de espesor de espuma de poliestireno. Calcule la conductividad térmica del laminado en direcciones paralela y perpendicular a las capas. La conductividad térmica del aluminio es de $0.57 \frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K}}$ y la de la espuma es de $0.000077 \frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K}}$.
- 17-47** Una hoja de 0.01 cm de espesor de un polímero con un módulo de elasticidad de 0.7×10^6 psi, está emparedado entre dos hojas de vidrio de 4 mm de espesor con un módulo de elasticidad de 12×10^6 psi. Calcule el

módulo de elasticidad del compuesto en direcciones paralela y perpendicular a las hojas.

- 17-48** Una moneda estadounidense de 25 centavos tiene un diámetro de $\frac{15}{16}$ de pulg, y aproximadamente $\frac{1}{16}$ de pulg de espesor. El cobre cuesta alrededor de \$1.10 por libra y, el níquel, cerca de \$4.10 por libra. Compare el costo del material en una moneda de compuesto contra el de una moneda fabricada totalmente de níquel.
- 17-49** Calcule la densidad de una estructura en panel formada por los elementos siguientes: las dos hojas de cierre de 2 mm de espesor se fabrican utilizando un material reforzado de matriz epóxica con un 55% en volumen de fibras de vidrio E. El panel de aluminio tiene un ancho de 2 cm; las celdas tienen forma de cuadrados de 0.5 cm de lado y sus paredes tienen un espesor de 0.1 mm. Estime la densidad de la estructura. Compare el peso de un panel de 1×2 m de este panel con un panel hecho de aluminio sólido de las mismas dimensiones.



Problemas de diseño

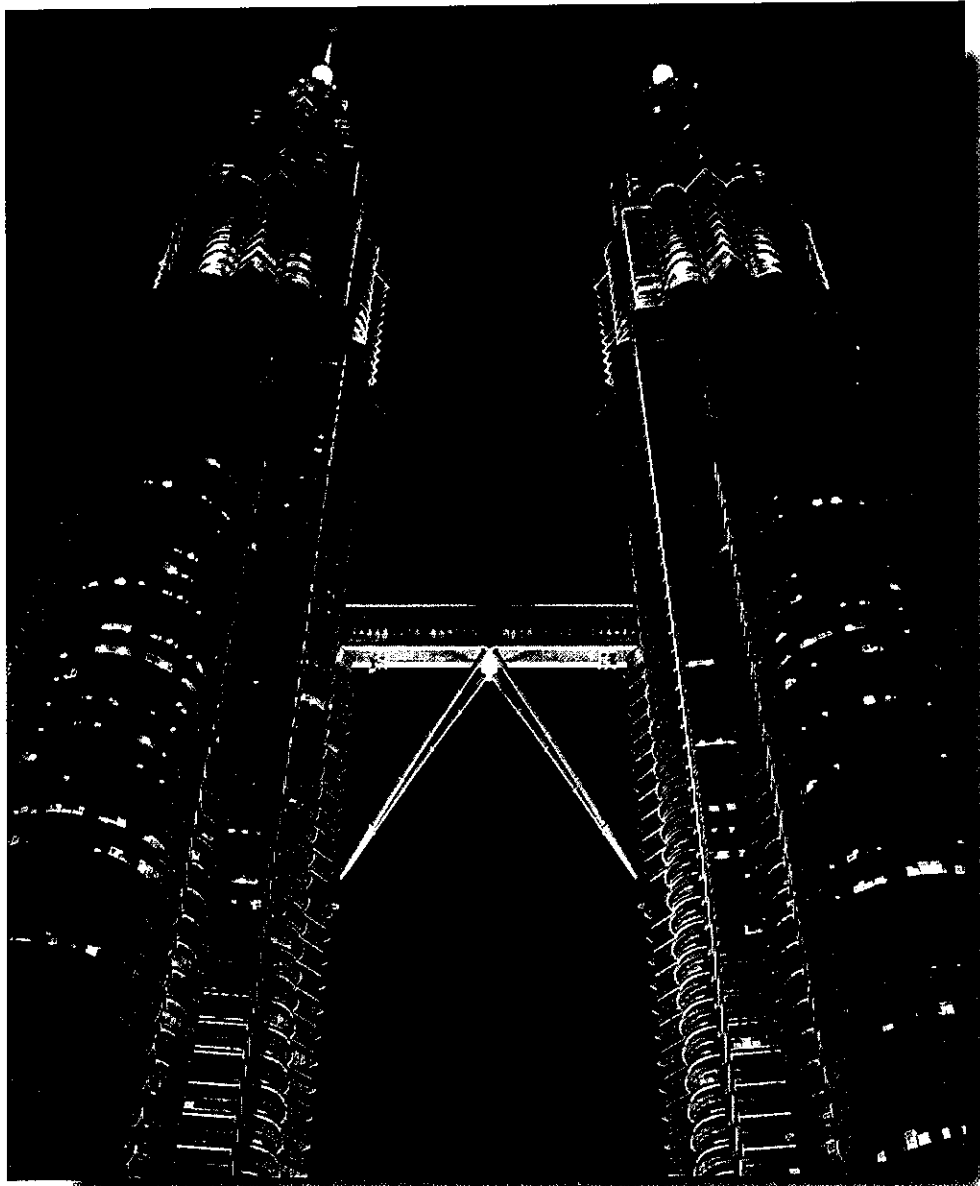
- 17-50** Diseñe los materiales y el procesamiento requeridos para producir un compuesto de fibra de vidrio reforzado con fibras discontinuas, pero alineadas, que servirá como cofre de un automóvil deportivo. El compuesto debe dar una densidad de menos de 1.6 g/cm^3 y una resistencia de 20 000 psi. Asegúrese de elaborar una lista de todas las hipótesis que usted haga para la creación de su diseño.
- 17-51** Diseñe un material para receptáculos eléctricos, así como un método para su producción, que resulte en una densidad no superior a 6 g/cm^3 , y que, sin embargo, por lo menos 50% en volumen del mismo sea conductor.
- 17-52** ¿Qué factores deberán considerarse para el diseño de la estructura de una bicicleta, utilizando aluminio y un compuesto C-C?

**Problemas de cómputo**

- 17-53** *Propiedades de compuestos laminares.* Escriba un programa de cómputo (o utilice una hoja de cálculo) para calcular las propiedades de un compuesto laminar. Por ejemplo, si el usuario proporciona el valor de la conductividad térmica de cada fase y la fracción volumétrica correspondiente, el programa debe dar el valor de la conductividad térmica efectiva. Deberán calcularse las propiedades en direcciones paralela y perpendicular a las laminillas.

**Knovel® Problemas**

- K17-1** Usando la regla de las mezclas, calcule la densidad del polipropileno que contenga 30% vol de relleno de talco. Compare la densidad calculada con la densidad común para este compuesto y explique la discrepancia, si la hay. Suponga que el polipropileno tiene una cristalinidad de 40-50 por ciento.



© J1123 | Dreamstime.com

Los materiales de construcción, por ejemplo acero, concreto, madera, vidrios, etc., así como materiales compuestos como la fibra de vidrio y otros, desempeñan un papel determinante en el desarrollo y conservación de la infraestructura de una nación. Aun cuando muchos de los actuales materiales de construcción están perfeccionados y las tecnologías para producirlos están plenamente desarrolladas, es posible ver nuevos avances en materiales de construcción. El uso de sensores y activadores inteligentes, que pueden ayudar a controlar estructuras u observar de manera continua el estado de estructuras, es uno de estos campos de actividad. El creciente uso de materiales compuestos y adhesivos poliméricos es una dimensión más que ha avanzado considerablemente. Procesos como la soldadura y la galvanización, así como fenómenos como la corrosión, juegan papeles importantes en la confiabilidad y durabilidad de estructuras.

Materiales de construcción

¿Se ha preguntado alguna vez?

- *¿Cuáles son los materiales de construcción manufacturados de más uso?*
- *¿Cuál es la diferencia entre el cemento y el concreto?*
- *¿Cuál de los materiales de construcción es un material compuesto existente en la naturaleza?*
- *¿Qué es el concreto reforzado?*

En la construcción de edificios, supercarreteras, puentes y una gran parte de la infraestructura del país, se han utilizado diversos materiales. En este capítulo se verán tres de los más importantes: la madera, el concreto y el asfalto. El campo de los materiales de construcción es de gran importancia para ingenieros, en especial para ingenieros civiles y los que trabajan en la construcción de carreteras. Las propiedades y el procesamiento de los aceros utilizados para la elaboración del concreto reforzado, los materiales cerámicos (por ejemplo arena, cal y concreto), los plásticos (por ejemplo los epóxicos y las espumas de poliestireno), los vidrios y compuestos (por ejemplo la fibra de vidrio) desempeñan un destacado papel en el desarrollo y uso de materiales de construcción. Otro campo de actividad en la ingeniería civil, cuya importancia es cada vez mayor, está relacionado con el uso de sensores y de activadores en edificios y puentes. Aquí desempeñan un papel sobresaliente los materiales avanzados, desarrollados para aplicaciones microelectrónicas y ópticas.

Por ejemplo, hoy en día se construyen puentes y edificios inteligentes equipados con sensores de fibra óptica. Estos sensores pueden vigilar en forma continua las condiciones físicas de estructuras, pudiendo así emitir avisos oportunos sobre cualquier problema potencial. De manera similar, investigadores en estructuras inteligentes también están trabajando en muchas otras ideas, utilizando sensores que pueden detectar fenómenos como la acumulación de hielo. Si se detecta hielo, el sistema puede poner en marcha un rociado de agua salada para impedir o retrasar la congelación. Existen también sensores de diseño avanzado que detectan nieve o hielo; se utilizan en rampas para cocheras muy inclinadas en estacionamientos comerciales donde, al activarse el sensor de nieve-hielo, se inicia la calefacción de esa sección de rampa. Igualmente, ya existen muchos recubrimientos inteligentes para vidrios, que pueden desviar el calor y hacer que los edificios sean eficientes en el consumo de energía.

También se encuentran nuevos recubrimientos que dan como resultado que los vidrios se limpien por sí solos; se están poniendo en práctica nuevas tecnologías para desarrollar "edificios ecológicos".

Existen muchas otras áreas de materiales que se relacionan con estructuras. Por ejemplo, en cualquier país es un costo de primer orden la corrosión en puentes y las limitaciones que ésta impone sobre la vida útil esperada de los puentes. Las estrategias que utilizan aceros galvanizados, así como las pinturas apropiadas para la protección contra la corrosión, desempeñan ahora un importantísimo papel en el diseño de puentes. Del mismo modo, muchas técnicas de unión de materiales, como la soldadura, tienen también una función preponderante en la construcción de puentes y edificios. Deben tomarse en consideración los impactos ambientales a largo plazo de los materiales utilizados. Por ejemplo, ¿cuáles son los mejores materiales para utilizarse en tuberías de agua, en aislamientos, en retardadores de fuego, etc.? El objetivo de este capítulo es presentar un resumen de las propiedades de la madera, del concreto y del asfalto.

18-1 Estructura de la madera

La madera, material compuesto de origen natural, es uno de los materiales más comunes. A pesar de que no se trata de un material de "alta tecnología", estamos prácticamente rodeados de madera en nuestros hogares y la valoramos por su belleza. Además, es un material resistente y ligero que sigue predominando en gran parte de la industria de la construcción.

La madera puede considerarse como un material compuesto complejo, reforzado con fibras y formado de células poliméricas largas, tubulares y alineadas en una dirección dentro de una matriz polimérica. Además, los tubos poliméricos están formados por paquetes de fibras de celulosa parcialmente cristalina, alineados en varias direcciones en relación con el eje de los tubos. Esta disposición proporciona excelentes propiedades a la tensión en la dirección longitudinal.

La madera está formada por cuatro constituyentes principales. Las fibras de **celulosa** representan más o menos de 40 a 50% de la madera. La celulosa es un polímero termoplástico de origen natural con un grado de polimerización de alrededor de 10 000. En la figura 18-1 se muestra la estructura de la celulosa. Aproximadamente de 25 a 35% de un árbol es **hemicelulosa**, polímero con un grado de polimerización de alrededor de 200. Otro 20 a 30% de un árbol es la **lignina**, cemento orgánico de bajo peso molecular que une los diversos constituyentes de la madera. Por último, los **extractivos** son impurezas orgánicas como aceites que le dan color a la madera o que actúan como preservadores contra el entorno y los insectos, así como minerales orgánicos como la sílice, que es un factor que desafilas las hojas de las sierras durante el corte de la madera. Los extractivos pueden representar hasta 10% del total de la madera.

Existen tres niveles importantes en la estructura de la madera: la estructura fibrosa, la estructura de celdas y la macroestructura (figura 18-2).

Estructura fibrosa El componente básico de la madera es la celulosa, $C_6H_{10}O_5$, organizada en cadenas poliméricas que forman largas fibras. Gran parte de la longitud de las

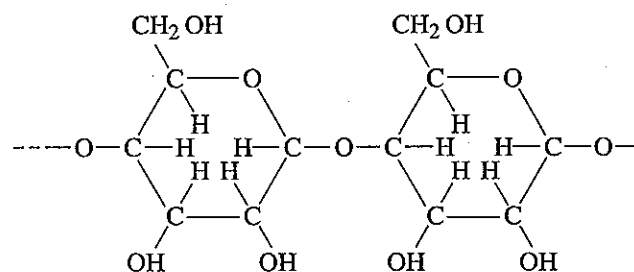


Figura 18-1
Estructura de los filamentos de celulosa en la madera.

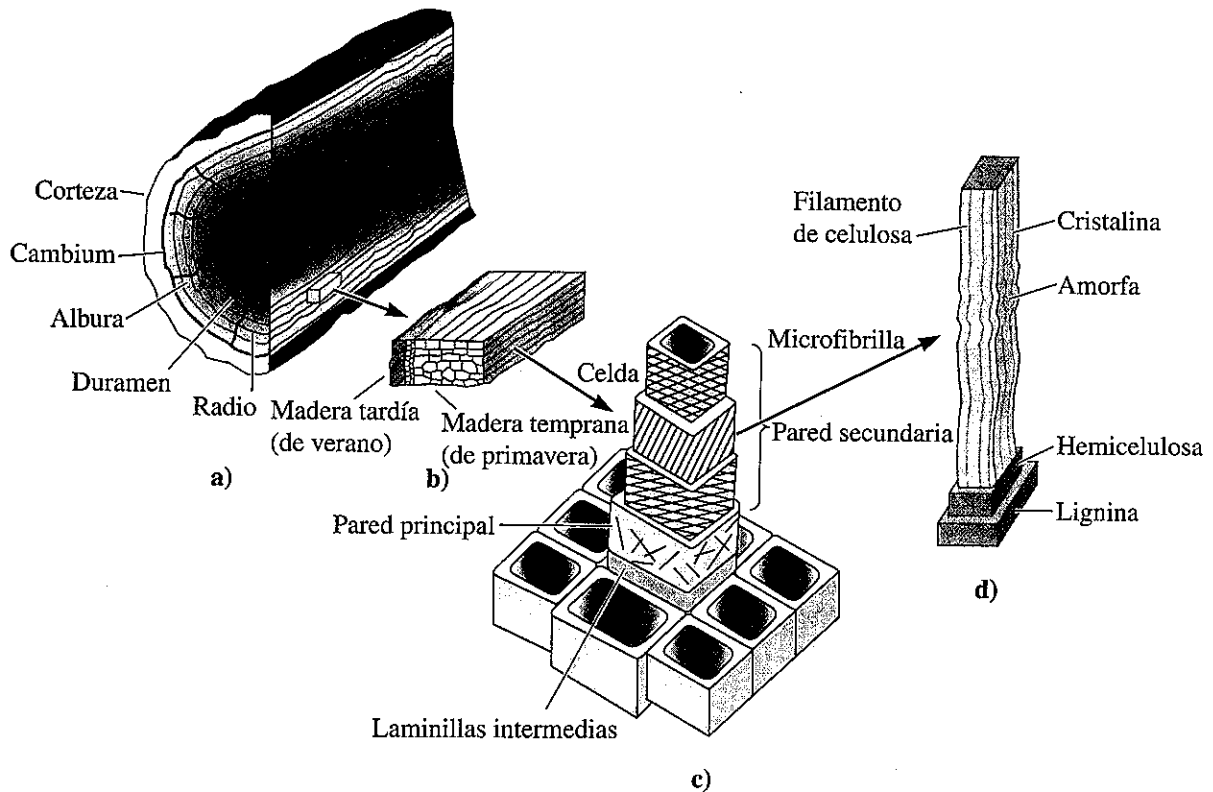
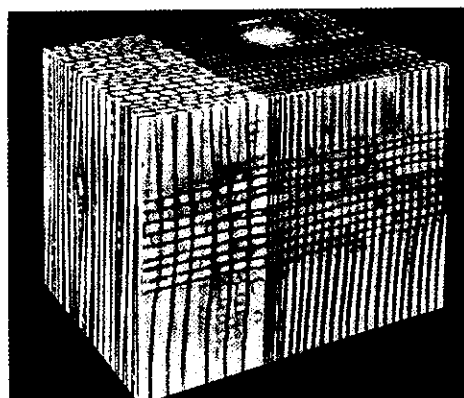


Figura 18-2 Estructura de la madera: a) macroestructura, que incluye una estructura en capas "bordeada" por anillos de crecimiento anual, b) detalle de la estructura de la celda dentro de un anillo de crecimiento anual, c) la estructura de una celda incluye varias capas formadas por microfibrillas de fibras celulósicas, de fibras de hemicelulosa y de lignina y d) cadenas de celulosa alineadas, parcialmente cristalinas existentes en la microfibrilla.

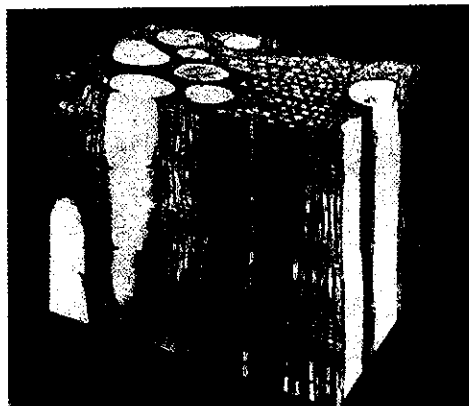
fibras es cristalina con las regiones cristalinas separadas por pequeños tramos de celulosa amorfa. Un paquete de cadenas de celulosa está recubierto por una capa de cadenas de hemicelulosa amorfa, con cadenas aleatoriamente orientadas. Por último, la hemicelulosa está cubierta de lignina [figura 18-2d]. Todo el paquete formado por cadenas de celulosa, cadenas de hemicelulosa y lignina se conoce como **microfibrilla**; ésta puede alcanzar una longitud prácticamente infinita.

Estructura de las celdas Un árbol está compuesto de celdas alargadas, con frecuencia con una proporción dimensional de 100 o mayor, y que constituyen alrededor del 95% del material sólido de la madera. Las células huecas están formadas por varias capas construidas a partir de las microfibrillas [figura 18-2c]. La primera pared, o pared principal de la celda, contiene microfibrillas de orientación aleatoria. Conforme se engruesa la pared de la celda, se forman tres capas distintas adicionales. Las paredes exterior e interior contienen microfibrillas orientadas en dos direcciones no paralelas a la celda. La pared intermedia, que es la de mayor espesor, contiene microfibrillas alineadas en una sola dirección, por lo general formando un ángulo no paralelo al eje de la celda.

Macroestructura Un árbol está formado por varias capas [figura 18-2a)]. La capa exterior, la *corteza*, protege al árbol. El *cambium*, justo por debajo de la corteza, contiene celdas de crecimiento nuevas. La *albura* contiene unas cuantas celdas vivas huecas que almacenan nutrientes y sirven como conducto para el agua. Por último, el *duramen*, que contiene sólo celdas muertas, proporciona la mayor parte del soporte mecánico para el árbol.



a)



b)

Figura 18-3 Estructura celular en a) madera blanda y b) madera dura. Las maderas blandas contienen celdas más grandes y más largas que las duras. Sin embargo, estas últimas contienen vasos de gran diámetro. El agua se transporta por las celdas en las maderas blancas; en las duras, por los vasos. (Fuente: J. M. Dinwoodie, *Wood: Nature's Cellular Polymeric Fiber-Composite*, The Institute of Metals, 1989.)

El árbol crece cuando se desarrollan nuevas celdas alargadas en el cambium. Al principio de la estación de crecimiento, las celdas son grandes; posteriormente, tienen un diámetro menor, paredes más gruesas y una densidad más elevada. Esta diferencia entre madera temprana (de *primavera*) y madera tardía (de *verano*) permite observar los anillos de crecimiento anual [figura 18-2b)]. Además, algunas celdas crecen en dirección radial; estas células, o *radios*, proporcionan el transporte y el almacenamiento de los alimentos.

Maderas duras en comparación con maderas blandas

Las maderas duras provienen de árboles de hoja caduca, como roble, fresno, nogal americano, olmo, haya, abedul, nogal y arce. En estos árboles, las celdas alargadas son relativamente cortas, con un diámetro de menos de 0.1 mm y una longitud de menos de 1 mm. Dentro de la madera existen poros longitudinales, o vasos, que transportan el agua por todo el árbol (figura 18-3).

Las maderas blandas son las coníferas, perennes como el pino, el abeto rojo, el pinabete, el abeto blanco y el cedro, que tienen estructuras similares. En las maderas blandas, las celdas tienden a ser algo más largas que en las maderas duras. El centro hueco de las celdas es el responsable de transportar el agua. En general, la densidad de las maderas blandas tiende a ser inferior a la de las maderas duras, debido a un mayor porcentaje de espacios huecos.

18-2

Contenido de humedad y densidad de la madera

El material con el que están constituidas las celdas individuales en prácticamente todas las maderas tiene en esencia la misma densidad, alrededor de 1.45 g/cm^3 . Sin embargo, la madera contiene espacios huecos que hacen que la densidad real sea muy inferior. La densidad de la madera depende principalmente de la especie del árbol (o de la cantidad de espacios vacíos peculiares a dicha especie) y del porcentaje de agua presente en la madera (que depende del grado de secado y de la humedad relativa a la cual se vea expuesta la madera durante su uso). Una madera seca por completo varía en densidad de 0.3 a 0.8 g/cm^3 ; las maderas duras tienen

TABLA 18-1 ■ Propiedades de maderas comunes

Madera	Densidad (para 12% de agua) (g/cm ³)	Módulo de elasticidad (psi)
Cedro	0.32	1 100 000
Pino	0.35	1 200 000
Abeto	0.48	2 000 000
Arce	0.48	1 500 000
Abedul	0.62	2 000 000
Roble	0.68	1 800 000

densidades más elevadas que las blandas. Pero la densidad medida es más alta, por lo general, debido al agua contenida en la madera. El porcentaje de agua está dado por

$$\% \text{ de agua} = \frac{\text{peso del agua}}{\text{peso de la madera seca}} \times 100 \quad (18-1)$$

Con base en esta definición, es posible describir una madera que contenga más de 100% de agua. El agua está tanto en las celdas huecas como en los vasos, donde no está retenida con firmeza, y en la estructura celulósica de las paredes de la celda, donde está más fuertemente unida a las fibras de la celulosa. Aun cuando en un árbol vivo se almacena gran cantidad de agua, la cantidad de agua en la madera después de cortar el árbol dependerá, por último, de la humedad a la cual la madera está expuesta; una humedad más elevada aumenta la cantidad de agua en las paredes de las celdas. La densidad de la madera está dada por lo general a un contenido de humedad de 12%, lo que corresponde a 65% de humedad. En la tabla 18-1 aparecen la densidad y el módulo de elasticidad en dirección paralela al grano de varias maderas comunes, para este contenido normal de agua.

El siguiente ejemplo ilustra el cálculo de la densidad de la madera.

Ejemplo 18-1

Una madera verde tiene una densidad de 0.86 g/cm³ y contiene 175% de agua. Calcule la densidad de la madera totalmente seca.

SOLUCIÓN

Una muestra de 100 cm³ de la madera debe pesar 86 g. A partir de la ecuación 18-1, se puede determinar que el peso (en este caso, la masa) de la madera seca es

$$\begin{aligned} \% \text{ de agua} &= \frac{\text{peso del agua}}{\text{peso de la madera seca}} \times 100 = 175 \\ &= \frac{\text{peso de madera verde} - \text{peso de madera seca}}{\text{peso de madera seca}} \times 100 = 175 \end{aligned}$$

Despejando el peso en seco de la madera:

$$\begin{aligned} \text{Peso de la madera seca} &= \frac{(100)(\text{peso de la madera verde})}{275} \\ &= \frac{(100)(86)}{275} = 31.3 \text{ g} \\ \text{Densidad de madera seca} &= \frac{31.3 \text{ g}}{100 \text{ cm}^3} = 0.313 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

18-3 Propiedades mecánicas de la madera

La resistencia de la madera depende de su densidad que, a su vez, depende tanto del contenido de agua como del tipo de madera. Conforme la madera se seca, primero se elimina el agua de los vasos y después de las paredes de las celdas. Si se elimina el agua de los vasos no se observa prácticamente ningún cambio en la resistencia o rigidez de la madera (figura 18-4). Si el proceso de secado continúa hasta menos de alrededor del 30% de agua, hay pérdida de agua de las fibras de celulosa propiamente dichas. Esta pérdida permite que las fibras individuales se acerquen unas a otras, lo que aumenta la unión entre las fibras, así como la densidad de la madera y, por tanto, incrementa la resistencia y la rigidez de la misma.

El tipo de madera también afecta la densidad. Dado que tienen una menor cantidad de madera tardía de densidad más elevada, las maderas blandas normalmente son menos densas y, por tanto, tienen resistencias inferiores que las maderas duras. Además, las celdas en las maderas blandas son más grandes, más largas y más abiertas que las de las maderas duras, lo que también resulta en una densidad menor.

Las propiedades mecánicas de la madera son altamente anisotrópicas. En la dirección longitudinal (figura 18.5), una carga de tensión aplicada actúa en dirección paralela a las microfibrillas y a las cadenas celulósicas en la sección media de la pared secundaria. Estas cadenas son resistentes, puesto que en su mayor parte son cristalinas y pueden soportar una

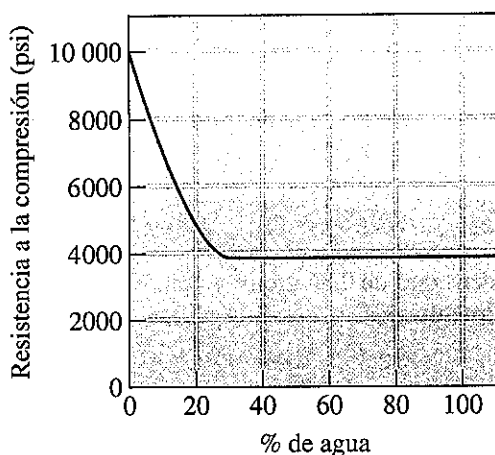


Figura 18-4

Efecto del porcentaje de agua de una madera común en la resistencia a la compresión en dirección paralela al grano.

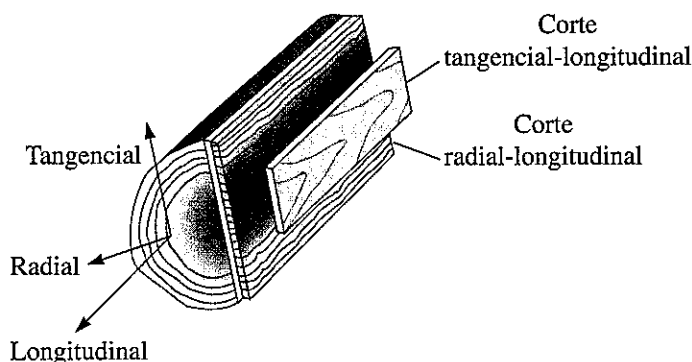


Figura 18-5

Diferentes direcciones en un leño. La madera tiene un comportamiento anisotrópico debido a diferencias en la orientación de las celdas y del grano.

TABLA 18-2 ■ Comportamiento anisotrópico de diversas maderas (al 12% de humedad)

	Resistencia a la tensión longitudinal (psi)	Resistencia a la tensión radial (psi)	Resistencia a la compresión longitudinal (psi)	Resistencia a la compresión radial (psi)
Haya	12 500	1010	7300	1010
Olmo	17 500	660	5520	690
Arce	15 700	1100	7830	1470
Roble	11 300	940	6200	810
Cedro	6600	320	6020	920
Abeto	11 300	390	5460	610
Pino	10 600	310	4800	440
Picea	8600	370	5610	580

carga relativamente alta. Sin embargo, en las direcciones radial y tangencial, las débiles uniones entre las microfibrillas y las fibras celulósicas se pueden romper, lo que resulta en propiedades a la tensión muy bajas. Un comportamiento similar se observa en cargas de compresión y de flexión. Debido a su comportamiento anisotrópico, la mayor parte de las maderas se corta en forma tangencial-longitudinal o radial longitudinal. Este tipo de corte maximiza el comportamiento longitudinal de la madera.

La madera limpia tiene propiedades deficientes a la compresión y la flexión (lo que produce una combinación de fuerzas de compresión y de tensión). A compresión, las fibras de las celdas tienden a pandearse, originando la deformación de la madera y su ruptura a bajos esfuerzos. Desafortunadamente, la mayor parte de las aplicaciones para la madera someten al componente a compresión o a flexión y, por tanto, no aprovechan por completo las propiedades de ingeniería del material. De igual manera, el módulo de elasticidad es bastante anisotrópico; el módulo perpendicular al grano es alrededor de 1/20 del que aparece en la tabla 18-1 para orientaciones paralelas al grano. La tabla 18-2 compara las resistencias a la tensión y a la compresión, tanto paralela como perpendicular a las celdas, para varias maderas.

La madera de primera, sin imperfecciones como los nudos, tiene una resistencia y un módulo específicos que se comparan bien con los de otros materiales comunes para la construcción (tabla 18-3). La madera también tiene una buena tenacidad, principalmente debido a la ligera desorientación de las fibras de celulosa en la capa intermedia de la pared secundaria. Bajo carga, las fibras se enderezan, lo que permite cierto grado de ductilidad y de absorción de energía. Las propiedades mecánicas de la madera también dependen de las imperfecciones que contenga. La madera de primera puede tener una resistencia a la tensión longitudinal de 10 000 a 20 000 psi. La madera de construcción de menor calidad y costo, que por lo general presenta numerosos defectos, puede tener una resistencia a la tensión inferior a 5000 psi. Los nudos desordenan el grano de la madera en su cercanía, haciendo que las celdas se orienten en forma perpendicular a la carga a la tensión.

TABLA 18-3 ■ Comparación de la resistencia y el módulo específicos de la madera con los de otros materiales de construcción comunes

Material	Resistencia específica ($\times 10^5$ pulg)	Módulo específico ($\times 10^7$ pulg)
Madera de primera	7.0	9.5
Aluminio	5.0	10.5
Acero 1020	2.0	10.5
Cobre	1.5	5.5
Concreto	0.6	3.5

Según F.F. Wangaard, "Wood: Its Structure and Properties", J. Educ. Models for Mat. Sci. and Engr., vol. 3, núm. 3, 1979.

18-4 Expansión y contracción de la madera

Al igual que otros materiales, la madera cambia de dimensiones al calentarse o al enfriarse. Los cambios dimensionales en la dirección longitudinal son muy pequeños en comparación con los de los metales, polímeros y materiales cerámicos, pero los cambios dimensionales en las direcciones radial y tangencial son más grandes que los de la mayor parte de los demás materiales.

Además de los cambios dimensionales causados por las fluctuaciones en la temperatura, el contenido de humedad en la madera causa cambios significativos en las dimensiones. De nuevo, los cambios de mayor importancia se presentan en las direcciones radial y tangencial, donde el contenido de humedad afecta el espaciado entre las cadenas celulósicas en las microfibrillas. El cambio en dimensión Δx en las direcciones radial y tangencial se puede aproximar con

$$\Delta x = x_0[c(M_f - M_i)] \quad (18-2)$$

donde x_0 es la dimensión inicial, M_i es el contenido inicial de agua, M_f es el contenido final de agua y c es el coeficiente que describe el cambio dimensional que se puede medir, ya sea en la dirección radial o en la tangencial. La tabla 18-4 incluye los coeficientes dimensionales para varias maderas. En la dirección longitudinal no se observan cambios superiores a 0.1 o 0.2%.

Durante el secado inicial de la madera, los grandes cambios dimensionales en la dirección perpendicular a las celdas causan torceduras e incluso grietas. Además, al utilizarse la madera, su contenido de humedad puede cambiar dependiendo de la humedad relativa del entorno. Puesto que la madera durante el uso adquiere o pierde agua, seguirá ocurriendo la contracción o la hinchazón. Si una construcción de madera no permite cierto movimiento causado por las fluctuaciones en la humedad, pueden presentarse pandeos o agrietamientos, situación particularmente severa en aplicaciones donde hay grandes extensiones de madera, como el piso de una habitación de gran tamaño. Una expansión excesiva puede causar grandes combas en el piso; una contracción demasiado grande puede causar grandes espacios entre los tablones del piso.

TABLA 18-4 ■ Coeficiente dimensional c (pulg/pulg·% H_2O) para varias maderas

Madera	Radial	Tangencial
Haya	0.00190	0.00431
Olmo	0.00144	0.00338
Arce	0.00165	0.00353
Roble	0.00183	0.00462
Cedro	0.00111	0.00234
Abeto	0.00155	0.00278
Pino	0.00141	0.00259
Picea	0.00148	0.00263

18-5 Madera contrachapada (triplay)

El comportamiento anisotrópico de la madera puede reducirse, y se pueden fabricar productos de madera en tamaños más grandes utilizando madera contrachapada. Partiendo de los troncos, normalmente de maderas blanda, se cortan hojas delgadas conocidas como **capas**. Estas capas se apilan unas sobre otras con los granos entre capas adyacentes orientados a 90° entre sí; por lo general, se utiliza un número impar de capas. Es importante cerciorarse de que estos ángulos resulten lo más preciso posible para asegurar que la madera contrachapada no se va a torcer o pandear al cambiar el contenido de humedad de la misma. Las capas individuales por lo general se unen entre sí mediante una resina fenólica termoestable. La resina se introduce entre las capas, que después se someten a presión mientras están calientes para hacer que la resina se polimerice.

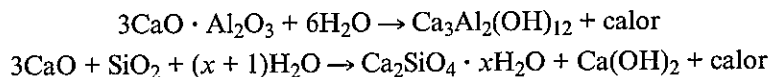
También se fabrican productos de madera de tipo similar en forma de materiales compuestos "laminares". Las capas visibles pueden ser de madera dura costosa y las centrales de una madera blanda menos costosa. Se pueden compactar partículas de madera en forma de hojas y laminares entre dos capas de madera para producir hojas de aglomerado. Las capas de madera se pueden utilizar como caras para materiales con estructura en panel.

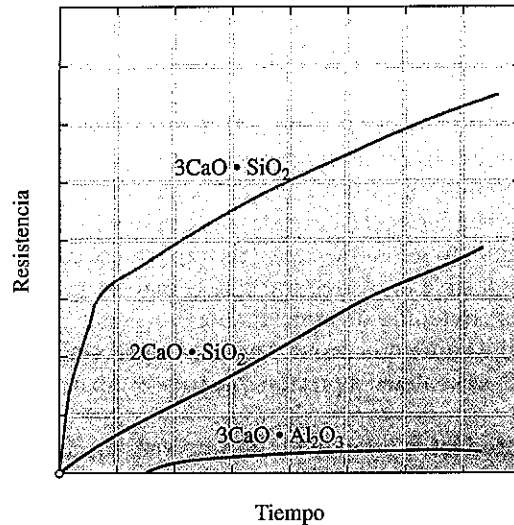
18-6 Materiales de concreto

Un **agregado** es una combinación de grava, arena, piedra triturada o escoria. El **mortero** se hace mezclando cemento, agua, aire y un agregado fino. El concreto contiene todos los ingredientes del mortero más los agregados gruesos. Los **cementos** son materiales inorgánicos que se aplican y endurecen después de ser mezclados, para formar una pasta usando agua. El **concreto** es un material compuesto de partículas separadas en el cual tanto los agregados como la matriz son materiales cerámicos. En el concreto, la arena y un agregado grueso se unen en una matriz de **cemento Portland**. Una reacción de cementación que ocurre entre el agua y los minerales del cemento proporciona una matriz resistente, que mantiene a los agregados en su sitio y da al concreto una buena resistencia a la compresión.

Cementos Se clasifican como hidráulicos y no hidráulicos. Los **cementos hidráulicos** fraguan y se endurecen en presencia de agua. Los **cementos no hidráulicos** (por ejemplo la cal, CaO) no pueden endurecerse en el agua y necesitan aire para su endurecimiento. El cemento Portland es el material manufacturado de más amplio uso en la construcción. Fue patentado por Joseph Aspdin en 1824 y se llama así por los acantilados de piedra caliza de la isla de Portland, en Inglaterra.

El cemento hidráulico se fabrica a partir de silicatos de calcio, con una composición aproximada de CaO (~60 a 65%), SiO₂ (~20 a 25%) y óxido de hierro y alúmina (~7 a 12%). El aglutinado del cemento, que es de partículas muy pequeñas, está compuesto de varias proporciones de 3CaO · Al₂O₃, 2CaO · SiO₂, 3CaO · SiO₂, 4CaO · Al₂O₃ · Fe₂O₃, y otros minerales. En terminología del cemento, a veces CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ se conocen como C, S, A y F, respectivamente. Por tanto, C₃S significa 3CaO-SiO₂. Cuando se le agrega agua al cemento, ocurre una reacción de hidratación que produce un gel sólido que une las partículas de agregados. Las reacciones posibles incluyen



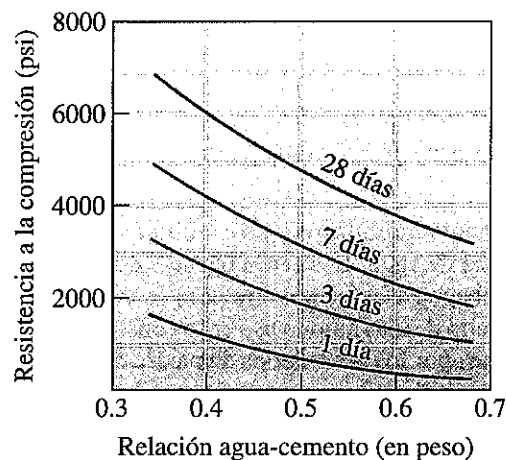
**Figura 18-6**

Rapidez de hidratación de los minerales en el cemento Portland. (Con base en Lea, Chemistry of Cement and Concrete, p. 286.)

Después de la hidratación, el cemento proporciona la unión para las partículas de agregados. En consecuencia, debe adicionarse suficiente cemento para recubrir todas las partículas de agregados. Normalmente, el cemento constituye alrededor del 15% volumétrico de los sólidos dentro del concreto.

La composición del cemento ayuda a determinar la rapidez del fraguado y las propiedades finales del concreto, como se ve en la figura 18-6. En general, se espera que el concreto fragüe totalmente en un plazo de 28 días (figura 18-7), aun cuando un poco de fraguado adicional puede continuar durante años.

Existen alrededor de 10 tipos generales de cementos. Algunos aparecen en la tabla 18-5. En estructuras grandes como son cortinas de presas, el fraguado debe ser lento para

**Figura 18-7**

La resistencia del concreto a la compresión aumenta conforme pasa el tiempo. Después de 28 días, el concreto prácticamente ha alcanzado su máxima resistencia.

TABLA 18-5 Tipos de cementos Portland

	Composición aproximada				Características
	3C · S	2C · S	3C · A	4C · A · F	
Tipo I	55	20	12	9	Uso general
Tipo II	45	30	7	12	Baja generación de calor, resistencia moderada a los sulfatos
Tipo III	65	10	12	8	Fraguado rápido
Tipo IV	25	50	5	13	Muy baja generación de calor
Tipo V	40	35	3	14	Buena resistencia a sulfatos

TABLA 18-6 ■ Características de materiales para concreto

Material	Densidad real	
Cemento	190 lb/ft ³	1 saco = 94 lb
Arena	160 lb/ft ³	
Agregado	170 lb/ft ³	Normal
	80 lb/ft ³	Escoria liviana
	30 lb/ft ³	Vermiculita liviana
	280 lb/ft ³	Fe ₃ O ₄ pesado
	390 lb/ft ³	Ferrofósforo pesado
Agua	62.4 lb/ft ³	Con 7.48 gal/ft ³

evitar un calentamiento excesivo causado por la reacción de hidratación. Estos cementos generalmente contienen bajos porcentajes de $3\text{Ca} \cdot \text{SiO}_2$, tales como en los cementos tipos II y IV. Sin embargo, algunos trabajos de construcción requieren que los encofrados o cimbras sean retirados y vueltos a usar tan rápido como sea posible; los cementos para estos fines pueden contener grandes cantidades de $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, como los del tipo III.

La composición del cemento también afecta la resistencia del concreto al ambiente. Por ejemplo, los sulfatos existentes en el suelo pueden atacar al concreto; proporciones más elevadas de $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ y $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ayudan a producir concretos más resistentes al sulfato, como en el tipo V.

Arena Desde el punto de vista químico, la arena es principalmente sílice (SiO_2). Las arenas son minerales finos, por lo general con un espesor del orden de 0.1 a 1.0 mm de diámetro. Con frecuencia contienen por lo menos cierta cantidad de agua absorbida, que debe tomarse en consideración al preparar una mezcla de concreto. La arena ayuda a llenar los huecos entre agregados más gruesos, lo que da un factor de empaquetamiento alto, reduce la cantidad de porosidad abierta (o interconectada) en el concreto terminado, y reduce problemas de desintegración del concreto debido a congelamiento y descongelamiento repetidos durante su vida de servicio.

Agregados Los agregados gruesos están compuestos de grava y piedra. Los agregados deben estar limpios, ser resistentes y durables. Las partículas de agregados que tienen forma angular redonda proporcionan resistencia debido al entrelazamiento mecánico entre las mismas, pero las partículas angulares también presentan una mayor superficie en la cual se pueden formar huecos o grietas. Normalmente se prefiere que el tamaño de los agregados sea grande; esta condición también reduce al mínimo el área de la superficie en la que pueden formarse grietas o huecos. El tamaño del agregado deberá corresponder con el tamaño de la estructura que se construya; las partículas de agregados no deben ser mayores al 20% del grosor de la estructura.

En algunos casos, se pueden utilizar agregados especiales. Es posible preparar concretos ligeros utilizando escorias minerales producidas durante operaciones siderúrgicas, porque contienen un aislamiento térmico mejor. Otra opción es producir concretos particularmente pesados utilizando minerales densos o hasta granalla de metal; estos concretos pesados se utilizan en la construcción de reactores nucleares para tener una mejor absorción de la radiación. En la tabla 18-6 se presentan las densidades de varios agregados.

18-7 Propiedades del concreto

Numerosos factores influyen en las propiedades del concreto. Algunos de los más importantes son la proporción agua-cemento, la cantidad de aire contenido y el tipo de agregados.



Figura 18-8

Prueba de revenido en la que se mide la deformación de una figura de concreto bajo su propio peso, que sirve para determinar la facilidad de trabajo de una mezcla de concreto.

Proporción agua-cemento

La proporción agua y cemento afecta el comportamiento del concreto en varias formas:

1. Debe agregarse una cantidad mínima de agua al cemento para asegurar que la totalidad del mismo experimenta la reacción de hidratación. Por tanto, un contenido de agua demasiado pequeño causa una resistencia baja. Normalmente el límite inferior de la proporción agua-cemento queda determinado por otros factores, su facilidad de trabajo, por ejemplo.
2. Una proporción elevada de agua-cemento mejora la **facilidad de trabajo** del concreto, esto es, la facilidad con la que la lechada o pasta aguada de concreto puede llenar todos los espacios de un encofrado. Las bolsas de aire o la porosidad interconectada causadas por la mala facilidad de trabajo del concreto reducen la resistencia y la durabilidad de la estructura de concreto. Esta facilidad de trabajo se puede medir utilizando una *prueba de revenido*. Por ejemplo, se produce una pieza de concreto de 12 pulg de altura (figura 18-8), que se deja sin tocar, soportada por su propio peso. Después de un tiempo, la pieza se deforma. La reducción en altura de la pieza se llama **revenido**. Por lo común, para lograr buena facilidad de trabajo se necesita que el concreto tenga una proporción agua-cemento mínima de alrededor de 0.4 (en peso). Un revenido más pronunciado, causado por una mayor proporción de agua-cemento, indica una mayor facilidad de trabajo. Los asentamientos de 1 a 6 pulg son comunes; se necesitan revenidos pronunciados para vaciar o colar encofrados angostos o complejos, en tanto que los revenidos ligeros pueden resultar satisfactorios para estructuras grandes, por ejemplo cortinas de presas.
3. Si se incrementa la proporción agua-cemento más allá del mínimo requerido para su facilidad de trabajo, se reduce la resistencia del concreto a la compresión. La resistencia a la compresión se mide generalmente determinando el esfuerzo requerido para romper un cilindro de concreto de 6 pulg de diámetro y 12 pulg de altura. La figura 18-9 muestra el efecto de la proporción agua-cemento en la resistencia del concreto.
4. Las proporciones elevadas de agua-cemento incrementan la contracción del concreto durante su fraguado, creando riesgo de agrietamiento.

Debido a los diferentes efectos de la proporción agua-cemento, es necesario llegar a un término medio entre resistencia, facilidad de trabajo y contracción. Una proporción común en peso es de 0.45 a 0.55. A fin de mantener una buena facilidad de trabajo, pueden agregarse plastificantes orgánicos a la mezcla, con muy pocos efectos sobre la resistencia.

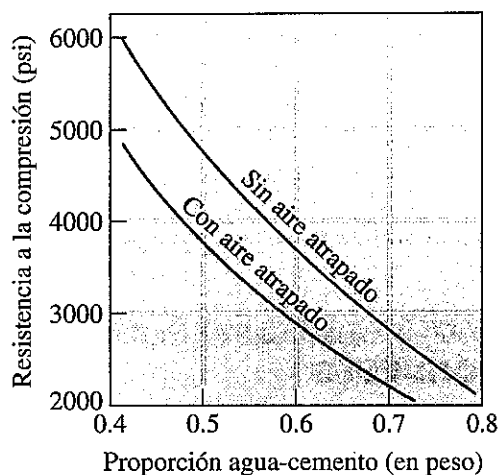


Figura 18-9

Efecto de la proporción agua-cemento, así como del aire atrapado, sobre la resistencia del concreto a la compresión a los 28 días.

Concreto con aire atrapado Durante el colado, casi siempre queda atrapada una pequeña cantidad de aire en el concreto. Para los agregados gruesos, como la piedra de 1.5 pulg, es posible que el 1% en volumen del concreto sea aire. En el caso de agregados finos, como grava de 0.5 pulg, se puede atrapar 2.5% de aire.

Algunas veces, de manera intencional, se atrapa aire dentro del concreto, en ocasiones hasta de 8% en el caso de grava fina. El aire atrapado mejora la facilidad de trabajo del concreto y ayuda a minimizar problemas relacionados con contracciones y situaciones de congelación-descongelación. Sin embargo, el concreto con aire atrapado tiene una menor resistencia (figura 18-9).

Tipo y cantidad de agregados Las dimensiones del agregado afectan la mezcla de concreto. La figura 18-10 muestra el agua por yarda cúbica que es necesaria para producir el revenimiento que se desea, es decir, la facilidad de trabajo; para agregados más finos, se requiere de más agua. La figura 18-11 indica la cantidad de agregados que deben estar presentes en la mezcla de concreto. La proporción en volumen del agregado se basa en la densidad volumétrica de este último, que es de alrededor del 60% de la densidad real que aparece en la tabla 18-6.

Los ejemplos que siguen muestran cómo calcular el contenido para una mezcla de concreto.

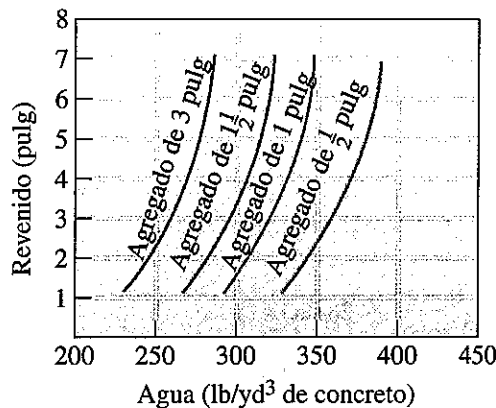


Figura 18-10

La cantidad de agua requerida por yarda cúbica de concreto, para obtener la facilidad de trabajo deseada (o asentamiento), depende del tamaño del agregado grueso.

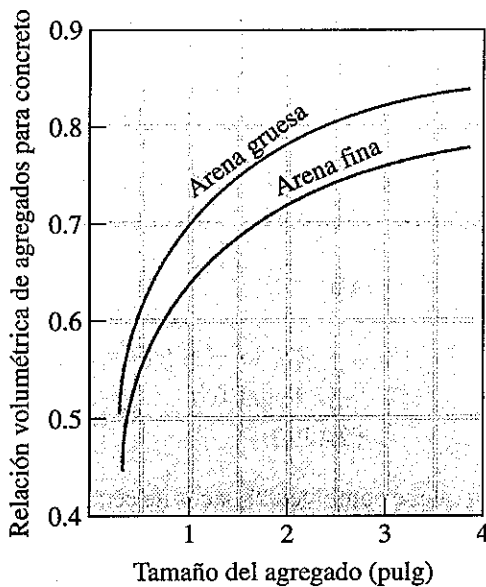


Figura 18-11

Proporción volumétrica de agregados para concreto, que depende de las dimensiones de la arena y de los agregados. Obsérvese que la relación volumétrica utiliza la densidad en volumen del agregado: aproximadamente 60% de la densidad real.

Ejemplo 18-2

Determine las cantidades de agua, cemento, arena y agregados para cinco yardas cúbicas de concreto, suponiendo que se desea obtener una proporción agua-cemento de 0.4 (en peso) y que la proporción cemento-arena-agregados es de 1:2.5:4 (en peso). Se usará un agregado "normal", con 1% de agua; la arena contiene 4% de agua. Suponga que no queda aire atrapado en el interior del concreto.

SOLUCIÓN

Un método para calcular la mezcla de concreto consiste en determinar primero el volumen de cada constituyente con base en un saco de cemento (94 lb). Se debe recordar que, después del vaciado del concreto, no existen huecos entre los diversos componentes; entonces, es menester tomar en cuenta en los cálculos la densidad real, no la volumétrica de los constituyentes.

Para cada saco de cemento que se usa, el volumen de los materiales requeridos es

$$\text{Cemento} = \frac{94 \text{ lb/saco}}{190 \text{ lb/ft}^3} = 0.495 \text{ ft}^3$$

$$\text{Arena} = \frac{2.5 \times 94 \text{ lb cemento}}{160 \text{ lb/ft}^3} = 1.469 \text{ ft}^3$$

$$\text{Grava} = \frac{4 \times 94 \text{ lb cemento}}{170 \text{ lb/ft}^3} = 2.212 \text{ ft}^3$$

$$\text{Agua} = \frac{0.4 \times 94 \text{ lb cemento}}{62.4 \text{ lb/ft}^3} = 0.603 \text{ ft}^3$$

Volumen total del concreto = 4.78 ft³/saco de cemento

Por tanto, en 5 yardas cúbicas (o sea 135 ft³), se necesita

$$\text{Cemento} = \frac{135 \text{ ft}^3}{4.78 \text{ ft}^3/\text{saco}} = 28 \text{ sacos}$$

$$\text{Arena} = (28 \text{ sacos})(94 \text{ lb/saco})(2.5 \text{ arena/cemento}) = 6580 \text{ lb}$$

$$\text{Grava} = (28 \text{ sacos})(94 \text{ lb/saco})(4 \text{ grava/cemento}) = 10\,528 \text{ lb}$$

$$\text{Agua} = (28 \text{ sacos})(94 \text{ lb/saco})(0.4 \text{ agua/cemento}) = 1053 \text{ lb}$$

La arena contiene 4% de agua y la grava 1% de agua. Para obtener el peso de la arena y la grava *húmedas*, se debe hacer un ajuste en el contenido de cada una de ellas:

$$\text{Arena} = (6580 \text{ seca})/0.96 = 6854 \text{ lb y agua} = 274 \text{ lb}$$

$$\text{Grava} = (10\,528 \text{ seca})/0.99 = 10\,634 \text{ lb y agua} = 106 \text{ lb}$$

Por tanto, realmente sólo se necesita agregar:

$$\begin{aligned} \text{Agua} &= 1053 \text{ lb} - 274 \text{ lb} - 106 \text{ lb} = 673 \text{ lb} \\ &= \frac{(673 \text{ lb})(7.48 \text{ gal/ft}^3)}{62.4 \text{ lb/ft}^3} = 81 \text{ gal} \end{aligned}$$

En consecuencia, se recomienda que se combinen 28 sacos de cemento, 6854 lb de arena y 10 634 lb de grava con 81 galones de agua.

Ejemplo 18-3

Diseñe una mezcla de concreto que proporcione, a los 28 días, una resistencia de 4000 psi a la compresión, para la construcción de un muro de retención de 5 pulg de espesor y 6 ft de altura. Se espera tener aproximadamente 2% de aire atrapado en el concreto, a pesar de que no queda atrapado en forma intencional. La grava contiene 1% de humedad y sólo se dispone de arena gruesa con 5% de humedad.

SOLUCIÓN

Se necesita cierta facilidad de trabajo en el concreto, a fin de estar seguros de que el encofrado se llenará por completo en el concreto. Podría resultar apropiado un revenimiento de 3 pulg para esta aplicación. El espesor de la pared es de 5 pulg. A fin de minimizar en lo posible los costos, se utilizará grava grande. Un agregado de 1 pulg de diámetro será el apropiado (aproximadamente 1/5 del espesor de la pared).

Para obtener la facilidad de trabajo deseada, utilizando grava de 1 pulg, se debe usar alrededor de 320 lb de agua por yarda cúbica (figura 18-10).

Para obtener una resistencia de 4000 psi a la compresión después de 28 días (suponiendo que no hay aire atrapado en forma intencional), se necesita una proporción de 0.57 en peso de agua a cemento (figura 18-9).

En consecuencia, el peso del cemento requerido por yarda cúbica de concreto es de $(320 \text{ lb de agua} / 0.57 \text{ de agua-cemento}) = 561 \text{ lb de cemento}$.

En vista de que el tamaño de la grava es de 1 pulg y sólo se dispone de arena gruesa, la proporción volumétrica de la grava al concreto es de 0.7 (figura 18.11). Entonces, la cantidad de grava requerida por yarda cúbica de concreto es de 0.7 yd^3 ; sin embargo, esta cantidad está en función de la densidad volumétrica del agregado. Dado que la densidad volumétrica es aproximadamente 60% de la densidad real, el volumen real ocupado por la grava dentro del concreto es de $0.7 \text{ yd}^3 \times 0.6 = 0.42 \text{ yd}^3$.

Se determina el volumen de cada uno de los constituyentes por yarda cúbica de concreto (27 ft^3), con la finalidad de calcular la arena requerida:

$$\begin{aligned}\text{Agua} &= 320 \text{ lb} / (62.4 \text{ lb/ft}^3) = 5.13 \text{ ft}^3 \\ \text{Cemento} &= 561 \text{ lb} / (190 \text{ lb/ft}^3) = 2.95 \text{ ft}^3 \\ \text{Agregado} &= 0.42 \text{ yd}^3 \times 27 \text{ ft}^3/\text{yd}^3 = 11.34 \text{ ft}^3 \\ \text{Aire} &= 0.02 \times 27 \text{ ft}^3 = 0.54 \text{ ft}^3 \\ \text{Arena} &= 27 - 5.13 - 2.95 - 11.34 - 0.54 = 7.04 \text{ ft}^3\end{aligned}$$

O bien, convirtiendo a otras unidades, suponiendo que el agregado y la arena están secas:

$$\begin{aligned}\text{Agua} &= 5.13 \text{ ft}^3 \times 7.48 \text{ gal/ft}^3 = 38.4 \text{ gal} \\ \text{Cemento} &= 561 \text{ lb} / (94 \text{ lb/saco}) = 6 \text{ sacos} \\ \text{Agregado} &= 11.34 \text{ ft}^3 \times 170 \text{ lb/ft}^3 = 1928 \text{ lb} \\ \text{Arena} &= 7.04 \text{ ft}^3 \times 160 \text{ lb/ft}^3 = 1126 \text{ lb}\end{aligned}$$

El agregado y la arena están húmedos. Por tanto, las cantidades reales de grava y de arena necesarias son:

$$\begin{aligned}\text{Agregado} &= 1928 / 0.99 = 1947 \text{ lb (19 lb de agua)} \\ \text{Arena} &= 1126 / 0.95 = 1185 \text{ lb (59 lb de agua)}\end{aligned}$$

La cantidad real de agua necesaria es

$$\text{Agua} = 38.4 \text{ gal} - \frac{(19 + 59 \text{ lb})(7.48 \text{ gal/ft}^3)}{62.4 \text{ lb/ft}^3} = 29.1 \text{ gal}$$

Entonces, para cada yarda cúbica de concreto se combinarán 6 sacos de cemento, 1947 lb de agregado, 1185 lb de arena y 29.1 galones de agua. Esto debe dar un revenimiento de 3 pulg (la facilidad de trabajo deseada), así como una resistencia de 4000 psi a la compresión después de 28 días.

18-8 Concreto reforzado y presforzado

El concreto, igual que otros materiales cerámicos, desarrolla una buena resistencia a la compresión. No obstante, debido a las porosidades y a las interfaces presentes en la frágil estructura, tiene muy malas propiedades a la tensión. Con el fin de mejorar la capacidad del concreto para soportar cargas de tensión se usan varios métodos.

Concreto reforzado Con frecuencia se introducen varillas de acero, alambcón o malla de acero, a fin de mejorar la resistencia del concreto a la tensión y a la flexión. Los esfuerzos de tensión se transfieren del concreto al acero, que tiene buenas propiedades de tensión. También se pueden utilizar fibras poliméricas, que tienen mayor resistencia a la corrosión, como refuerzo. Por lo que se refiere a los esfuerzos de flexión, el acero soporta la parte sujeta a tensión; la parte bajo compresión la soporta el concreto.

Concreto presforzado En lugar de simplemente colocar varillas de acero como refuerzo en el encofrado, se les puede estirar entre una ancla y un gato mecánico, quedando así bajo tensión durante el colado y el fraguado del concreto. Una vez fraguado el concreto, se libera la tensión sobre el acero que entonces trata de relajarse de su posición estirada, pero la restricción causada por el concreto circundante coloca a este último en compresión. Ahora es posible aplicar al concreto esfuerzos más elevados de tensión y de flexión, debido a los esfuerzos residuales compresivos introducidos por el acero pretensado. A fin de permitir que la tensión externa pueda ser retirada oportunamente, en estas aplicaciones con frecuencia se utilizan cementos de fraguado rápido del tipo III.

Concreto postensado Un método opcional para colocar el concreto bajo compresión consiste en poner tubos huecos en el concreto antes del vaciado. Una vez fraguado el concreto, las varillas de acero o los cables que se colocan en los tubos se pueden estirar en

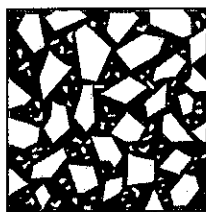
tensión, actuando en contra del concreto. Conforme las varillas se colocan en tensión, el concreto es puesto en compresión. Las varillas o cables se aseguran entonces de manera permanente en su estado estirado.

18-9 Asfalto

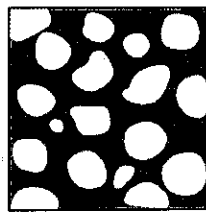
El asfalto es un material compuesto de agregados y **bitumen**, polímero termoplástico que casi siempre se obtiene del petróleo. El asfalto es un material importante para la pavimentación de carreteras. Las propiedades del asfalto se determinan en función de las características de los agregados y de su aglutinante, de sus cantidades relativas y de los aditivos.

El agregado, al igual que en el caso del concreto, debe estar limpio, tener ángulos y una distribución de tamaños de grano para obtener un elevado factor de compactación y un buen entrelazamiento entre sus granos (figura 18-12). El aglutinante, compuesto de cadenas termoplásticas, une a las partículas del agregado; tiene un margen de temperaturas útiles relativamente estrecho, ya que se hace frágil a temperaturas inferiores a 0 y empieza a fundirse a temperaturas relativamente bajas. Se pueden utilizar aditivos como la gasolina y el queroseno para modificar el aglutinante, permitir que se licue con más facilidad durante su mezclado y acelerar su fraguado después de su aplicación.

La proporción de aglutinante a agregados es importante. Deberá añadirse justo la cantidad suficiente de aglutinante, de manera que las partículas del agregado se toquen, minimizando así los huecos. Un exceso de aglutinante permitirá la deformación viscosa del asfalto bajo carga. En un asfalto común se encuentra presente alrededor de 5 a 10% de bitumen. También se requiere de un poco de espacios vacíos, por lo general de 2 a 5%. Cuando el asfalto se somete a compresión, el aglutinante puede pasar a los huecos, en vez de ser expulsado de la superficie y perderse. Sin embargo, demasiado espacio vacío permite que el agua penetre en la estructura incrementando la rapidez de deterioro del asfalto y puede hacerse frágil el aglutinante. Se utilizan emulsiones de asfalto para sellar calzadas. El agregado para asfalto es por lo general arena y grava fina; no obstante, hay algún interés en usar productos reciclados de vidrio como agregados. El **glasfalto** es una aplicación útil del vidrio triturado. De manera similar, también existen aplicaciones para materiales desarrollados con asfalto y neumáticos desmenuzados.



a)



b)

Figura 18-12

Estructura ideal para el asfalto a) en comparación con la estructura no deseable, b) en la que los granos redondeados, una distribución angosta de granos y exceso de aglutinante reducen en conjunto la resistencia del material final.

Resumen

- Los materiales de construcción desempeñan una función vital en la infraestructura de cualquier país. Los materiales de construcción de más uso son el concreto, la madera, el asfalto, el vidrio, los materiales compuestos y los aceros.
- También los materiales avanzados, utilizados en la fabricación de sensores y activadores, representan un papel de importancia creciente en la vigilancia del estado físico de edificios y puentes. También existen nuevos recubrimientos y películas delgadas sobre vidrios que han contribuido a una mayor eficiencia en el uso de la energía en edificios.
- La madera es un compuesto polimérico reforzado con fibras de origen natural. Las fibras de celulosa están formadas por celdas alineadas que proporcionan un excelente refuerzo en la dirección longitudinal de la madera, pero poca resistencia y rigidez en direcciones perpendiculares a las celdas y a las fibras. Las propiedades de la madera, por tanto, son altamente anisotrópicas y dependen de la especie del árbol y de la cantidad de humedad presente en la madera. La madera también tiene una buena resistencia a la tensión, pero una deficiente resistencia a la compresión.
- El concreto es un compuesto particulado. En el concreto se utilizan partículas cerámicas como arena y grava para rellenos en una matriz de cemento cerámico. La proporción de agua-cemento es un factor de particular importancia que determina el comportamiento del concreto. Este comportamiento se puede modificar atrapando aire y variando la composición tanto del cemento como de los materiales agregados. El concreto tiene una buena resistencia a la compresión, pero su resistencia a la tensión es deficiente.
- El asfalto también es un compuesto particulado; utiliza el mismo tipo de agregados que el concreto, pero en un aglutinante polimérico orgánico.

Glosario

Agregado Combinación de grava, arena, piedra triturada o escoria.

Albura Celdas huecas vivas de la madera que almacenan nutrientes y sirven de conducto para el agua.

Bitumen Aglutinante orgánico para el asfalto, formado de polímeros y aceites de bajo punto de fusión.

Cambium Capa de celdas en crecimiento en la madera.

Capas Hojas individuales de chapa de madera con las cuales se fabrica la madera contrachapada.

Celulosa Fibra polimérica natural que es el más importante de los constituyentes de la madera. Tiene un alto grado de polimerización.

Cemento hidráulico Cemento que fragua y se endurece bajo el agua.

Cemento no hidráulico Cemento que no puede endurecer bajo el agua y que requiere de aire para su endurecimiento.

Cemento Portland Cemento hidráulico hecho de silicatos de calcio; la composición aproximada es CaO (~60-65%), SiO_2 (~20-25%), así como óxido de hierro y alúmina (~7 a 12%).

Cementos Materiales inorgánicos que fraguan y se endurecen después de haberse mezclado con agua en una pasta.

Concreto Material compuesto formado por un medio aglomerante en el que las partículas del agregado están dispersas.

Duramen Centro del árbol, formado por celdas muertas, que le da soporte mecánico al árbol.

Extractivos Impurezas existentes en la madera.

Facilidad de trabajo Facilidad con que una lechada de concreto llena todo el espacio del interior de un encofrado.

Glasfalto Asfalto cuyo agregado incluye vidrio reciclado.

Hemicelulosa Fibra polimérica natural que es un constituyente importante en la madera. Tiene un bajo grado de polimerización.

Lignina Cemento polimérico en la madera que une entre sí las celdas de ésta.

Microfibrilla Paquetes de celulosa y otras cadenas poliméricas que sirven de fibras de refuerzo en la madera.

Mortero Se elabora mezclando cemento, agua, aire y agregados finos. El concreto tiene todos los agregados del mortero y además agregados gruesos.

Revenimiento Reducción en altura de una forma estándar de concreto cuando éste se asienta por efecto de su propio peso.

Problemas

Sección 18-1 Estructura de la madera

Sección 18-2 Contenido de humedad y densidad de la madera

Sección 18-3 Propiedades mecánicas de la madera

Sección 18-4 Expansión y contracción de la madera

Sección 18-5 Madera contrachapada (triplay)

18-1 La tabla 18-1 contiene las densidades para maderas comunes. Calcule las densidades de las maderas después de haberse secado por completo y tener un contenido de agua de 100%.

18-2 Una muestra de madera con dimensiones de 3 pulg $\times$ 4 pulg $\times$ 12 pulg tiene una densidad de 0.35 g/cm³ en seco.

- Calcule la cantidad de galones de agua que la muestra debe absorber para que llegue a contener 120% de agua.
- Calcule la densidad de la madera después de que haya absorbido esta cantidad de agua.

18-3 La densidad de una muestra de roble es de 0.90 g/cm³. Calcule

- la densidad del roble totalmente seco y
- el porcentaje de humedad en la muestra original.

18-4 Una madera verde con densidad de 0.82 g/cm³ contiene 150% de agua. La resistencia a la compresión de esta madera es de

27 MPa. Después de varios días de secado, la resistencia a la compresión aumenta a 41 MPa. ¿Cuál es el contenido de agua y la densidad de la madera seca? Consulte la figura 18-4.

18-5 Se utilizan tablas de roble de 0.5 cm de grueso, 1 m de largo y 0.25 m de ancho para el piso de una superficie de 10 $\times$ 10 m. Si el piso fue colocado con un contenido de humedad de 25% y la humedad esperada podría ser de hasta 45%, determine el cambio en las dimensiones del piso, paralelo y perpendicular a la longitud de las tablas. Las tablas fueron cortadas de troncos con un corte tangencial-longitudinal.

18-6 En una sala de 60 $\times$ 60 pies se utiliza un piso hecho de tablonces de arce de 1 pulg de espesor, 6 pulg de ancho y 16 pies de largo. Los tablonces fueron cortados utilizando un corte tangencial-longitudinal. El piso se coloca cuando los tablonces alcanzan un contenido de humedad de 12%. Después de algunos días particularmente húmedos, la humedad de los tablonces aumenta hasta 45%. Determine el cambio dimensional en el piso en la dirección paralela a los tablonces y también perpendicular a los mismos. ¿Qué le pasará al piso? ¿Cómo puede corregirse este fenómeno?

18-7 Se está construyendo un muro de 30 pies de largo utilizando cortes radiales-longitudinales de pino de 5 pulg de ancho y disponiendo los tablonces en forma vertical. La madera contiene 55% de humedad al construirse el muro; sin embargo, se mantiene el nivel de

humedad en la habitación para darle 45% de humedad a la madera. Determine los cambios dimensionales que ocurrirán en los tablonés y estime el tamaño de los huecos que se producirán como consecuencia de dichos cambios.

Sección 18-6 Materiales de concreto

Sección 18-7 Propiedades del concreto

Sección 18-8 Concreto reforzado y presforzado

Sección 18-9 Asfalto

18-8 Determine las cantidades de agua, cemento y arena en 10 m^3 de concreto, si la proporción de cemento, arena y agregado es de 1:2.5:4.5 y la proporción de agua y cemento es de 0.4. Suponga que no hay aire atrapado en el concreto. La arena empleada para esta mezcla contiene 4% en peso de agua y el agregado contiene 2% en peso de agua.

18-9 Calcule la cantidad de cemento, arena, agregado y agua necesarios para crear una mezcla de concreto con una resistencia de 34 MPa a la compresión, después de 28 días, para una estructura de $10 \times 10 \times 0.25 \text{ m}$ dadas las siguientes condiciones: revenimiento permitido = 10 cm y para este proyecto sólo se dispone de agregado de 3.8 cm (1.5 pulg), con 2% de humedad, y arena gruesa con 4% de humedad. En sus cálculos suponga que no hay aire atrapado.

18-10 Se ha solicitado preparar 100 yd^3 de concreto normal que utiliza una proporción volumétrica de cemento, arena y agregado grueso de 1:2:4. La proporción de agua y cemento (en peso) debe ser de 0.5. La arena contiene 6% y la grava 3% de agua en peso. No se espera que entre aire.

- Determine el número de sacos de cemento que deben pedirse, las toneladas de arena y de agregado requeridas, así como el agua necesaria.
- Calcule el peso total del concreto por yarda cúbica.

c) ¿Cuál es la proporción en peso de cemento, arena y agregado grueso?

18-11 Se piensa preparar 10 yd^3 de concreto utilizando una proporción en peso de 1:2.5:4.5 de cemento, arena y agregado grueso. La proporción de agua y cemento (en peso) es de 0.45. La arena contiene 3% en peso de agua, el agregado grueso 2% y se espera aire atrapado por un equivalente de 5%. Determine el número de sacos de cemento, las toneladas de arena y de agregado grueso, así como los galones de agua necesarios.



Problemas de diseño

18-12 Una estructura de madera está operando como sistema controlado por el entorno a una humedad de 65%. Diseñe una columna de soporte de madera que debe sostener una carga de 20 000 libras. La distancia de la parte superior a la inferior de la columna deberá ser de 96 ± 0.25 pulg, una vez aplicada la carga.

18-13 Diseñe un piso de madera de $50 \times 50 \text{ ft}$, que estará en un ambiente donde los cambios en la humedad causarán una fluctuación de más o menos 5% de agua en la madera. Se desea reducir al mínimo cualquier pandeo o formación de espacios libres en la madera.

18-14 Se desea producir un concreto adecuado para su uso en la construcción de una estructura grande en un ambiente sulfuroso. Para estas situaciones, la proporción máxima de agua y cemento deberá ser 0.45 (en peso). La resistencia del concreto a la compresión, después de 28 días, deberá ser por lo menos de 4000 psi. Se dispone de agregado grueso que contiene 2% de humedad en varios tamaños, así como arena fina y gruesa con 4% de humedad. Diseñe un concreto que sea adecuado para esta aplicación.

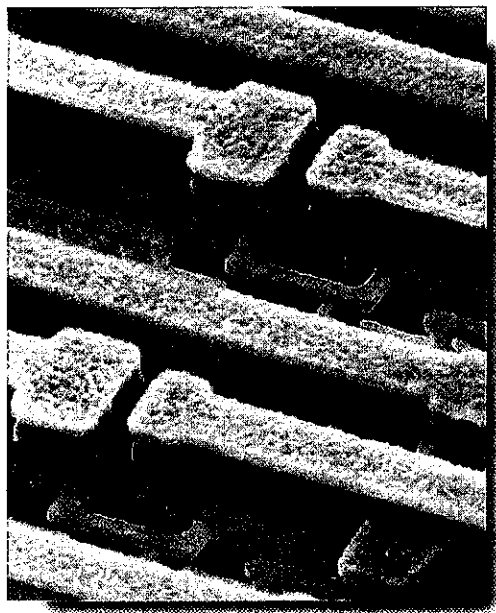
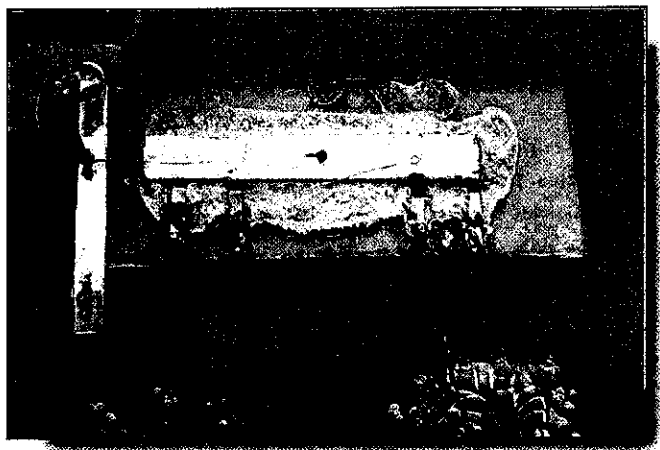
18-15 Se desea producir una escultura de concreto. En algunos sitios, la escultura tendrá un espesor de 3 pulg y deberá ser ligera, pero deberá tener una resistencia de 2000 lb psi a la compresión después de 28 días. El agre-

gado disponible contiene 1% de humedad y la arena 5% de humedad. Diseñe un concreto adecuado para esta aplicación.

- 18-16** El aglutinante que se utiliza para producir el asfalto tiene una densidad de aproximadamente 1.3 g/cm^3 . Diseñe un asfalto, incluyendo tanto el peso como los volúmenes de cada uno de los elementos incluidos, que pueda ser adecuado para usarse como pavimento. Suponga que las arenas y los agregados son los mismos que los de un concreto normal.
- 18-17** *Diseño de una canoa de concreto.* Describa qué novedosos materiales podrían usarse para hacer una canoa de concreto.

Knovel® Problemas

- K18-1** ¿Cuál es la diferencia en el contenido de lignina entre especies de madera dura y de madera blanda? ¿Cuál es la estructura química de la lignina?
- K18-2** El contenido de humedad de equilibrio de la madera es el contenido de humedad al que la madera no gana ni pierde humedad. ¿Cuál es el contenido de humedad de la madera a 70°F con una humedad relativa de 50%?
- K18-3** ¿Qué medidas se utilizan para controlar el agrietamiento en el concreto reforzado?



El primer circuito integrado lo fabricó en 1958 Jack Kilby, quien era entonces ingeniero en Texas Instruments. El primer circuito integrado funcionó como oscilador de desplazamiento de fase y estaba formado por transistores, resistores y condensadores (también llamados *capacitores*) como se ve en la imagen superior (cortesía de *Texas Instruments*). Por primera vez, dispositivos electrónicos múltiples se incorporaron en un solo sustrato. Por esta innovación, a Jack Kilby se le otorgó el Premio Nobel de Física en el año 2000.

Los microchips de hoy en día pueden contener cientos de millones de transistores. Los chips de memoria dinámica de acceso aleatorio (MDAA) han pasado la marca del millar de millones de transistores. Esta integración de dispositivos ha sido posible mediante refinados equipos y técnicas de manufactura. La imagen de arriba muestra las capas múltiples de cobre necesarias para las conexiones entre transistores y otros elementos de circuito. El óxido aislante entre los alambres ha sido eliminado. Los transistores no son visibles en esta imagen. (Cortesía de *IBM*.)

Capítulo

Materiales electrónicos

¿Se ha preguntado alguna vez?

- ¿Si el diamante es buen conductor de electricidad?
- ¿Cuántos dispositivos hay en un microchip?
- ¿Cómo se depositan películas delgadas, de menos de 1 micrón de grueso, en un sustrato?
- ¿Cómo se calientan los alimentos en un horno de microondas?

La microelectrónica basada en el silicio es una parte omnipresente en la vida moderna. Con microchips en aparatos que van desde máquinas lavarrupas y hornos de microondas hasta teléfonos celulares, en reproductores MP3 y de computadoras personales a las computadoras más rápidas del mundo, el silicio fue el material definitorio del siglo xx y dominará las tecnologías basadas en computadoras y relacionadas con la información para el futuro previsible.

Si bien el silicio es el sustrato o material base elegido para la mayoría de los dispositivos, la microelectrónica incluye materiales de casi todas las clases, incluyendo metales como cobre y oro, otros semiconductores como arseniuro de galio y aislantes como el dióxido de silicio; hasta los polímeros semiconductores están encontrando aplicaciones en dispositivos como son los diodos emisores de luz.

En este capítulo se estudiarán los principios de conductividad la eléctrica en metales, semiconductores, aislantes y materiales iónicos. Se verá que una diferencia determinante entre metales y semiconductores es que, cuando se incrementa la temperatura, la resistividad de un metal también aumenta, mientras que la resistividad de un semiconductor disminuye. Esta diferencia de importancia crítica surge de la **estructura de banda** de estos materiales. La estructura de banda está formada por el conjunto de niveles de energía que existen o están prohibidos para que los electrones los ocupen, y determina el comportamiento electrónico de un sólido, ya se trate de un conductor, semiconductor o de un aislantes.

Capítulo

Materiales electrónicos

¿Se ha preguntado alguna vez?

- *¿Si el diamante es buen conductor de electricidad?*
- *¿Cuántos dispositivos hay en un microchip?*
- *¿Cómo se depositan películas delgadas, de menos de 1 micrón de grueso, en un sustrato?*
- *¿Cómo se calientan los alimentos en un horno de microondas?*

La microelectrónica basada en el silicio es una parte omnipresente en la vida moderna. Con microchips en aparatos que van desde máquinas lavavajillas y hornos de microondas hasta teléfonos celulares, en reproductores MP3 y de computadoras personales a las computadoras más rápidas del mundo, el silicio fue el material definitorio del siglo xx y dominará las tecnologías basadas en computadoras y relacionadas con la información para el futuro previsible.

Si bien el silicio es el sustrato o material base elegido para la mayoría de los dispositivos, la microelectrónica incluye materiales de casi todas las clases, incluyendo metales como cobre y oro, otros semiconductores como arseniuro de galio y aislantes como el dióxido de silicio; hasta los polímeros semiconductores están encontrando aplicaciones en dispositivos como son los diodos emisores de luz.

En este capítulo se estudiarán los principios de conductividad la eléctrica en metales, semiconductores, aislantes y materiales iónicos. Se verá que una diferencia determinante entre metales y semiconductores es que, cuando se incrementa la temperatura, la resistividad de un metal también aumenta, mientras que la resistividad de un semiconductor disminuye. Esta diferencia de importancia crítica surge de la **estructura de banda** de estos materiales. La estructura de banda está formada por el conjunto de niveles de energía que existen o están prohibidos para que los electrones los ocupen, y determina el comportamiento electrónico de un sólido, ya se trate de un conductor, semiconductor o de un aislantes.

dispersan electrones y contribuyen a una mayor resistividad. Del mismo modo, la resistividad del cobre puro recocido es un poco menor que la del cobre puro trabajado en frío, debido al efecto de dispersión asociado con las dislocaciones.

En componentes diseñados para conducir energía eléctrica, es importante reducir al mínimo las pérdidas de energía, no sólo para conservar ésta sino también para reducir también al mínimo el calentamiento. La potencia eléctrica P (en watts, W) perdida cuando una corriente pasa por una resistencia está dada por

$$P = VI = I^2 R \quad (19-3)$$

Una elevada resistencia R resulta en pérdidas más grandes de potencia. Estas pérdidas eléctricas se conocen como pérdidas de calentamiento de Joule.

Se obtiene una segunda forma de la ley de Ohm si se combinan las ecuaciones 19-1 y la 19-2 para obtener

$$\frac{I}{A} = \sigma \frac{V}{l}$$

Si se define I/A como la **densidad de corriente** J (A/cm²) y V/l como el **campo eléctrico** E (V/cm), entonces

$$J = \sigma E \quad (19-4)$$

La densidad de corriente J también se da con

$$J = nq\bar{v}$$

donde n es el número de portadores de carga (portadores/cm³), q es la carga en cada portador (1.6×10^{-19} C) y $\bar{v}$ es el promedio de la **velocidad de deriva** (cm/s) al que se mueven los portadores de carga [figura 19-1a)]. Entonces,

$$\sigma E = nq\bar{v} \text{ o } \sigma = nq \frac{\bar{v}}{E}$$

Ocurre una difusión como resultado de gradientes de temperatura y de concentración, y el desplazamiento se presenta como resultado de un campo eléctrico o magnético aplicado. La conducción puede ocurrir como resultado de la difusión, desplazamiento, o ambos, pero el desplazamiento es el mecanismo dominante en la conducción eléctrica.

El término $\bar{v}/E$ se llama **movilidad** μ $\left(\frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}\right)$ de los portadores (que en el caso de metales es la movilidad de los electrones):

$$\mu = \frac{\bar{v}}{E}$$

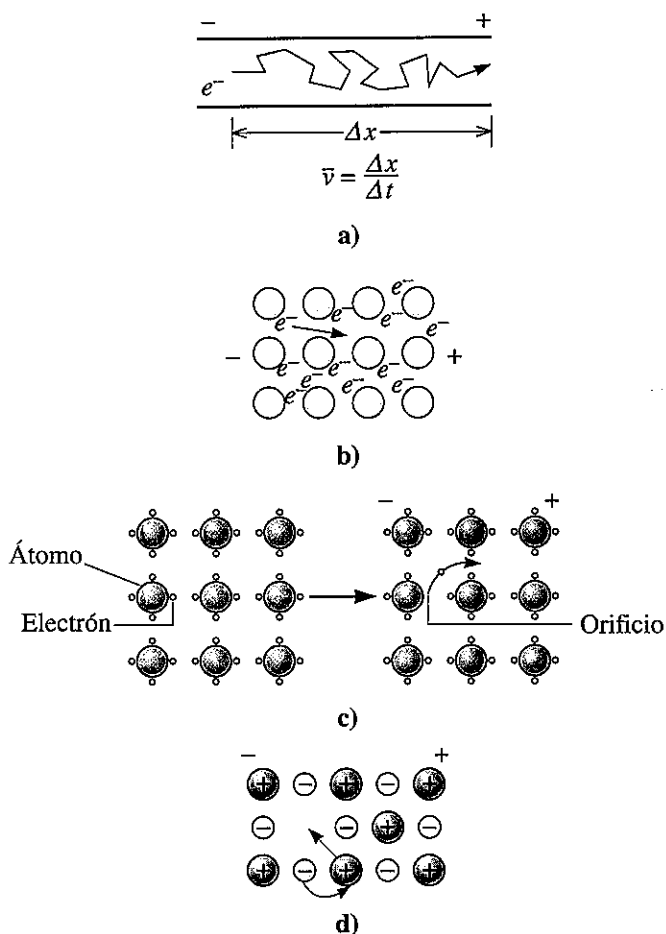
Por último,

$$\sigma = nq\mu \quad (19-5a)$$

La carga q es una constante; por inspección de la ecuación 19-5a, se encuentra que es posible controlar la conductividad eléctrica de materiales al (1) controlar el número de portadores de carga en el material o (2) controlar la movilidad, o facilidad de movimiento, de los portadores de carga. La movilidad es particularmente importante en metales, mientras que el número de portadores es más importante en semiconductores y en aislantes.

Los electrones son los portadores de carga en metales [figura 19-1b)]. Por supuesto que los electrones tienen carga negativa. En semiconductores, los electrones conducen carga en la misma forma que los portadores de carga positiva conocidos como **orificios** o **huecos** [figura 19-1c)]. Se aprenderá más acerca de los orificios en la sección 19-4. En semiconductores, los electrones y los orificios se mueven en direcciones opuestas en respuesta a un campo eléctrico aplicado, pero, al hacerlo así, contribuyen ambos a la corriente neta. Por tanto, la ecuación 19-5a se puede modificar como sigue, para expresar la conductividad de semiconductores:

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p \quad (19-5b)$$

**Figura 19-1**

Los portadores de carga, por ejemplo electrones, son desviados por átomos o defectos y toman una trayectoria irregular por un conductor. El promedio de rapidez al que se mueven los portadores es la velocidad de deriva $\bar{v}$. b) Los electrones de valencia en metales se mueven con facilidad. c) Los enlaces covalentes deben romperse en semiconductores y aislantes que no contienen impurezas para que un electrón pueda moverse. d) En muchos materiales enlazados iónicamente, es necesario que se difundan iones completos vía mecanismos de vacancia para transportar carga.

En esta ecuación, μ_n y μ_p son las movilidades de electrones y orificios, respectivamente. Los términos n y p representan las concentraciones de electrones libres y orificios en el semiconductor.

En cerámicas, cuando ocurre la conducción, puede ser el resultado de electrones que “saltan” de un defecto a otro o del movimiento de iones [figura 19-1d)]. La movilidad depende del enlace atómico, de las imperfecciones, de la microestructura y, en compuestos iónicos, de la rapidez de difusión.

Debido a estos efectos, la conductividad eléctrica de los materiales varía considerablemente, como se ilustra en la tabla 19-1. Estos valores son aproximados y son para materiales de una alta pureza a 300 K (a menos que se indique de otro modo). Observe que los valores de la conductividad para metales y semiconductores dependen en gran medida de la temperatura. La tabla 19-2 incluye algunas unidades y relaciones útiles.

Los materiales electrónicos pueden clasificarse como a) superconductores, b) conductores, c) semiconductores y d) dieléctricos o aislantes, dependiendo de la magnitud de su conductividad eléctrica. Los materiales con una conductividad menor a $10^{-12} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, o resistividad mayor a $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$, son considerados aislantes o dieléctricos; los materiales con conductividad menor a $10^3 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ pero mayor a $10^{-12} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ son considerados semiconductores. Los materiales con conductividad mayor a $10^3 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, o resistividad menor a $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$, son considerados conductores. (Éstos son intervalos aproximados de valores.)

TABLA 19-1 ■ Conductividad eléctrica de materiales seleccionados a $T = 300\text{ K}^*$

Material	Conductividad ($\text{ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Material	Conductividad ($\text{ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)
Superconductores		Semiconductores	
Hg, Nb_3Sn	Infinita (bajo ciertas condiciones, p. ej. bajas temperaturas)	Elementos del Grupo 4B	
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$		Si	4×10^{-6}
MgB_2		Ge	0.02
Metales		Semiconductores compuestos	
Metales alcalinos		GaAs	2.5×10^{-9}
Na	2.13×10^5	AlAs	0.1
K	1.64×10^5	SiC	10^{-10}
Metales alcalinotérreos		Conductores iónicos	
Mg	2.25×10^5	Óxido de estaño indio (ITO)	
Ca	3.16×10^5	Circonio estabilizado con itrio (YSZ)	
Metales del Grupo 3B		Aislantes, dieléctricos lineales y no lineales	
Al	3.77×10^5	Polímeros	
Ga	0.66×10^5	Polietileno	10^{-15}
Metales de transición		Politetrafluoretileno	10^{-18}
Fe	1.00×10^5	Poliestireno	10^{-17} a 10^{-19}
Ni	1.46×10^5	Epoxi	10^{-12} a 10^{-17}
Metales del Grupo 1B		Cerámicas	
Cu	5.98×10^5	Alúmina (Al_2O_3)	10^{-14}
Ag	6.80×10^5	Vidrios de silicato	10^{-17}
Au	4.26×10^5	Nitruro de boro (BN)	10^{-13}
		Titanato de bario (BaTiO_3)	10^{-14}
		C (diamante)	$< 10^{-18}$

*A menos que se especifique de otro modo, se supone un material de alta pureza.

TABLA 19-2 ■ Algunas relaciones, constantes y unidades de utilidad

Electrón volt = $1\text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{ joules} = 1.6 \times 10^{-12}\text{ erg}$
1 amp = 1 coulomb/segundo
1 volt = 1 amp. ohm
k_B T a temperatura ambiente (300 K) = 0.0259 eV
c = velocidad de la luz $2.998 \times 10^8\text{ m/s}$
ϵ_0 = permisividad del espacio libre = $8.85 \times 10^{-12}\text{ F/m}$
q = carga del electrón = $1.6 \times 10^{-19}\text{ C}$
Constante de Avogadro $N_A = 6.022 \times 10^{23}$
k_B = constante de Boltzmann = $8.63 \times 10^{-5}\text{ eV/K} = 1.38 \times 10^{-23}\text{ J/K}$
h = constante de Planck $6.63 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s} = 4.14 \times 10^{-15}\text{ eV}\cdot\text{s}$

El término “dieléctrico” se usa para materiales que se utilizan en aplicaciones donde la constante dieléctrica es importante. La **constante dieléctrica (k)** de un material es una propiedad sensible a la microestructura relacionada con la capacidad del material para almacenar una carga eléctrica. Se usa el término “aislante” para describir la capacidad de un material para detener el paso de una corriente directa o alterna, en contraposición a su capacidad para almacenar una carga. Una medida de la efectividad de un aislante es el campo eléctrico máximo que puede soportar sin ruptura eléctrica.

Ejemplo 19-1*Diseño de una línea de transmisión*

Diseñe una línea de transmisión eléctrica de 1500 m de largo que llevará una corriente de 50 A con una pérdida de potencia no mayor a 5×10^5 W. La conductividad eléctrica de diversos materiales está incluida en la tabla 19-1.

SOLUCIÓN

La potencia eléctrica está dada por el producto del voltaje y la corriente, o sea

$$P = VI = I^2R = (50)^2R = 5 \times 10^5 \text{ W}$$

$$R = 200 \text{ ohms}$$

De la ecuación 19-2,

$$A = \frac{l}{R \cdot \sigma} = \frac{(1500 \text{ m})(100 \text{ cm/m})}{(200 \text{ ohms})\sigma} = \frac{750}{\sigma}$$

Considere tres metales: aluminio, cobre y plata, que tienen una excelente conductividad eléctrica. La tabla siguiente incluye datos apropiados y algunas características de la línea de transmisión para cada metal.

	σ ($\text{ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)	A (cm^2)	Diámetro (cm)
Aluminio	3.77×10^5	0.00199	0.050
Cobre	5.98×10^5	0.00125	0.040
Plata	6.80×10^5	0.00110	0.037

Cualquiera de los tres metales funcionará, pero el costo también es un factor. Es probable que el aluminio sea la opción más económica (capítulo 14), aun cuando tiene el diámetro más grande. Otros factores, por ejemplo si el alambre puede sostenerse a sí mismo entre postes de transmisión, también contribuyen a la selección final.

Ejemplo 19-2*Valencia del cobre y el número de electrones en cobre*

Suponiendo que todos los electrones de valencia contribuyeran al paso de corriente, a) calcule la movilidad de un electrón en cobre y b) calcule el promedio de la velocidad de deriva para electrones en un alambre de cobre de 100 cm cuando se le aplican 10 V.

SOLUCIÓN

- a) La valencia del cobre es 1; por tanto, el número de electrones de valencia es igual al número de átomos de cobre en el material. Este parámetro de red de cobre es 3.6151×10^{-8} cm y, como el cobre es CCCa, hay cuatro átomos por celda unitaria. De la tabla 19-1, la conductividad es $\sigma = 5.98 \times 10^5 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$

$$n = \frac{(4 \text{ átomos/celda})(1 \text{ electrón/átomo})}{(3.6151 \times 10^{-8} \text{ cm})^3} = 8.466 \times 10^{22} \text{ electrones/cm}^3$$

$$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$\begin{aligned}\mu &= \frac{\sigma}{nq} = \frac{5.98 \times 10^5}{(8.466 \times 10^{22})(1.6 \times 10^{-19})} \\ &= 44.1 \frac{\text{cm}^2}{\Omega \cdot \text{C}} = 44.1 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}\end{aligned}$$

b) El campo eléctrico es

$$E = \frac{V}{l} = \frac{10}{100} = 0.1 \text{ V/cm}$$

La movilidad es $44.1 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$; por tanto,

$$\bar{v} = \mu E = (44.1)(0.1) = 4.41 \text{ cm/s}$$

19-2 Estructura de las bandas de sólidos

Como se vio en el capítulo 2, los electrones de átomos individuales ocupan niveles fijos y discretos de energía. El principio de exclusión de Pauli se satisface para cada átomo porque sólo dos electrones, como máximo, ocupan cada nivel de energía, u órbita. Cuando N átomos se unen para formar un sólido, el principio de exclusión de Pauli sigue exigiendo que no más de dos electrones del sólido tengan la misma energía. Cuando dos átomos se aproximan entre sí para formar un enlace, el principio de exclusión de Pauli se violaría si los niveles de energía de los electrones no cambiaran. Entonces, los niveles de energía de los electrones “se dividen” para formar nuevos niveles de energía.

La figura 19-2 ilustra este concepto de manera esquemática. Considere dos átomos que se aproximan entre sí para formar un enlace. Las órbitas que contienen los electrones de valencia están localizadas (en promedio) más alejadas del núcleo que las órbitas que contienen el “núcleo” o electrones interiores. Las órbitas que contienen los electrones de valencia de un átomo interactúan primero entonces con las órbitas que contienen los electrones de valencia del otro átomo. Como las órbitas de estos electrones tienen la misma energía cuando los átomos están en aislamiento, las órbitas cambian de energía o “se dividen”, de modo que se satisface el principio de exclusión de Pauli. Como se ve en la figura 19-2, cuando se consideran dos átomos, cada uno con una órbita de interés, una de las órbitas se pasa al nivel de energía más alto mientras que la otra órbita se pasa al nivel de energía más bajo. Los electrones de los átomos ocuparán estas nuevas órbitas al llenar primero los niveles de energía más bajo. A medida que aumenta el número de átomos, también se incrementa el número de niveles de energía. Se forma una nueva órbita con su propia energía, por cada órbita de cada átomo, y cuando aumenta el número de átomos del sólido, la separación en energía entre órbitas se hace más fina, formando en última instancia lo que se denomina banda de energía. Por ejemplo, cuando N átomos se unen para formar un sólido, la banda de energía $2s$ contiene N niveles discretos de energía, uno por cada átomo del sólido porque cada átomo contribuye con una órbita.

Para que los portadores de carga conduzcan, los portadores deben tener capacidad de acelerarse y aumentar en energía. La energía de los portadores puede aumentar sólo si hay estados de energía disponibles a los que puedan ser promovidos los portadores. Entonces, la distribución particular de estados de energía en la estructura de banda de un sólido tiene implicaciones de importancia decisiva para sus propiedades eléctricas y ópticas.

Dependiendo del tipo de material involucrado (metal, semiconductor, aislante), puede o no haber una brecha de energía entre los niveles de energía de las órbitas, que pasaron a un estado más bajo de energía, y los niveles de energía de las órbitas que pasaron a

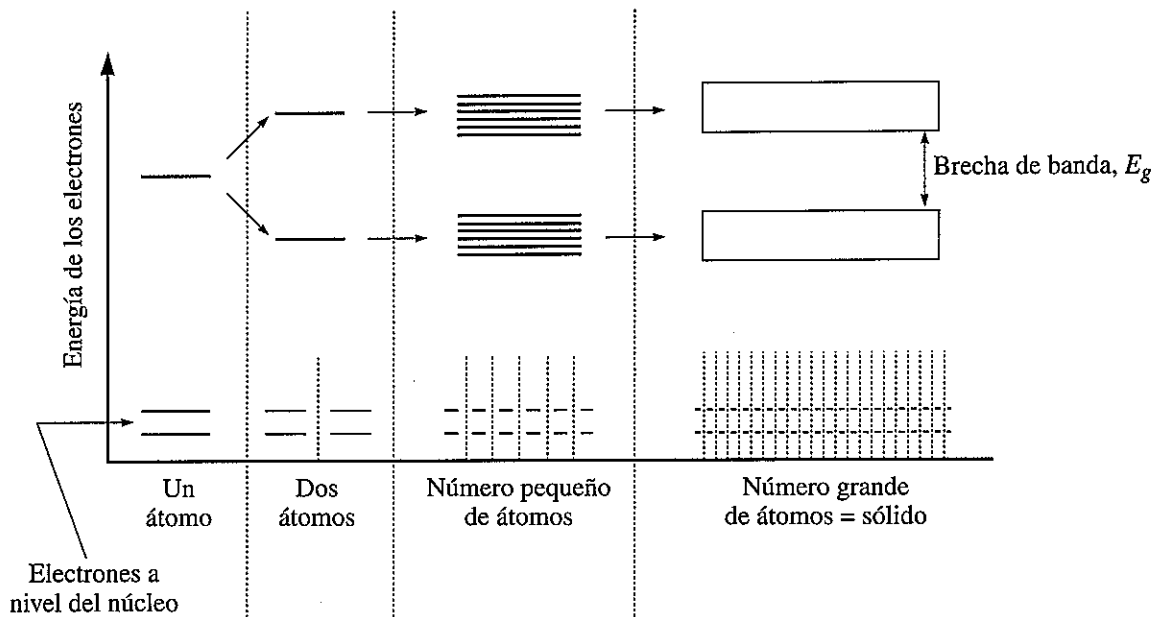


Figura 19-2 Los niveles de energía se ensanchan en bandas cuando aumenta el número de electrones agrupados. (Cortesía de John Bravman.)

un estado de energía más alto. Esta brecha de energía, si existe, se conoce como brecha de banda. Más adelante se estudiará esta brecha de banda.

Estructura de las bandas del sodio El sodio es un metal y tiene la estructura electrónica $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$. La figura 19-3 muestra un diagrama esquemático de la estructura de sodio como función de la separación interatómica. (Observe que la figura 19-2 presenta un

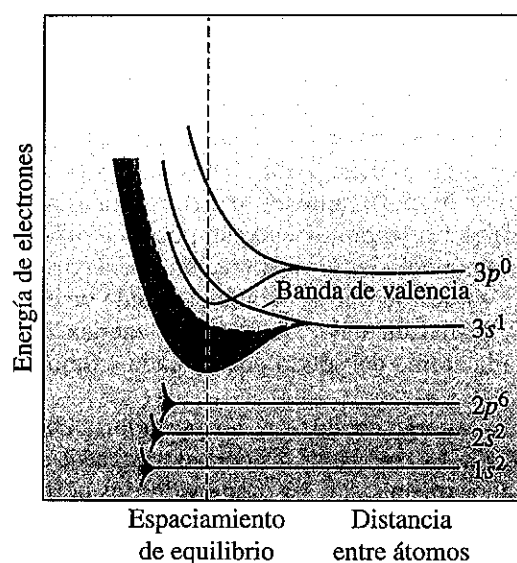


Figura 19-3

Estructura simplificada de las bandas para el sodio. Los niveles de energía se ensanchan en bandas. La banda $3s$, que está llena sólo a la mitad de electrones, es causante de la conducción en el sodio. Observe que los niveles de energía de las órbitas en los niveles $1s$, $2s$ y $2p$ no se dividen en el espaciamiento de equilibrio para el sodio.

diagrama general de las bandas para una separación interatómica fija.) Las energías dentro de las bandas dependen de la separación entre los átomos; la línea vertical representa la separación interatómica de equilibrio de los átomos en sodio sólido.

El sodio y otros metales alcalinos de la columna 1A de la tabla periódica tienen sólo un electrón en el nivel s más externo. La banda de valencia $3s$ en el sodio está llena a la mitad y, en el cero absoluto, sólo estarán ocupados los niveles más bajos de energía. La **energía de Fermi** (E_F) es el nivel de energía en el que la mitad de los posibles niveles de energía de la banda está ocupada por electrones. Es el nivel de energía donde la probabilidad de hallar un electrón es $1/2$. Cuando los electrones ceden energía, son excitados hacia los niveles vacíos de más alta energía. La promoción de portadores a niveles más altos de energía hace posible la conducción eléctrica.

Estructura de las bandas del magnesio y otros metales

El magnesio y otros metales de la columna 2A de la tabla periódica tienen dos electrones en su banda s más exterior. Estos metales tienen una elevada conductividad porque la banda p se traslapa con la banda s en el espaciado interatómico de equilibrio. Este traslape permite que los electrones sean excitados hacia el número más grande de niveles de energía desocupados en la banda combinada $3s$ y $3p$. El traslape de las bandas $3s$ y $3p$ en el aluminio y otros metales en la columna 3B da un efecto similar.

En los metales de transición, incluyendo desde escandio hasta níquel, una banda $3d$ no llena se traslapa con la banda $4s$. Este traslape produce niveles de energía en los que se pueden excitar electrones; no obstante, complejas interacciones entre las bandas impiden que la conductividad sea tan alta como en algunos de los mejores conductores. En el cobre, la banda interior $3d$ está llena, y las capas electrónicas internas del átomo contienen fuertemente a estos electrones. En consecuencia, hay poca interacción entre los electrones de las bandas $4s$ y $3d$, y el cobre tiene una alta conductividad. Se encuentra una situación similar para la plata y el oro.

Estructura de las bandas de semiconductores y aislantes

Los elementos del grupo 4, que son el carbono (diamante), silicio, germanio y estaño, contienen dos electrones en su capa exterior p y tienen una valencia de cuatro. Con base en la explicación de la sección previa, se podría esperar que estos elementos tuvieran alta conductividad debido a la banda p no llena, pero ¡este comportamiento no se observa!

Estos elementos están enlazados de manera covalente; en consecuencia, los electrones de las bandas exteriores s y p están rígidamente unidos a los átomos. El enlace covalente produce un cambio complejo en la estructura de las bandas. En los niveles $2s$ y $2p$ de los átomos de carbono en el diamante pueden contener hasta ocho electrones, pero sólo hay cuatro electrones de valencia disponibles. Cuando los átomos de carbono se unen para formar diamante sólido, los niveles $2s$ y $2p$ interactúan y producen dos bandas (figura 19-4). Cada una de las bandas híbridas puede contener $4N$ electrones. Como hay sólo $4N$ electrones disponibles, la banda inferior (o de **valencia**) está llena por completo, mientras que la banda superior (o de **conducción**) está vacía.

Una gran **brecha de energía** o **brecha de banda** (E_g) separa la banda de valencia de la banda de conducción en el diamante ($E_g \sim 5.5$ eV). Pocos electrones poseen suficiente energía para saltar la zona prohibida hasta la banda de conducción. Por tanto, el diamante tiene una conductividad eléctrica de menos de $10^{-18} \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}$. Otros materiales enlazados de manera covalente o iónica tienen una estructura similar de banda y, al igual que el diamante, son malos conductores de la electricidad. Un aumento de temperatura proporciona la energía requerida para que los electrones superen la brecha de energía. Por ejemplo, la conductividad eléctrica del nitrato de boro aumenta de unos 10^{-13} a temperatura ambiente a $10^{-4} \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ a 800°C .

La figura 19-5 muestra un diagrama de la estructura de las bandas de metales, semiconductores y aislantes comunes. Entonces, una distinción importante entre metales y semiconductores es que la conductividad de los semiconductores *aumenta* con la temperatura, a

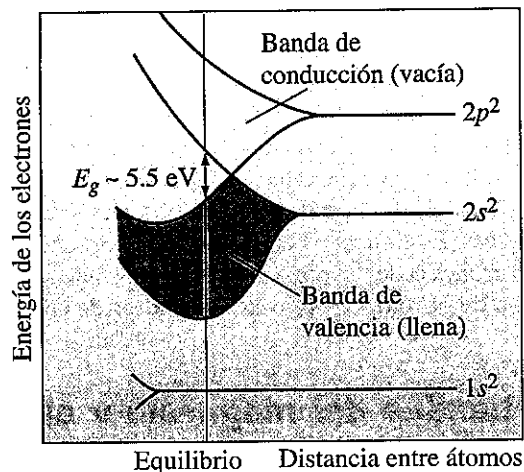


Figura 19-4

Estructura de las bandas del carbono en forma de diamante. Los niveles $2s$ y $2p$ se combinan para formar dos bandas híbridas separadas por una brecha de energía, E_g .

medida que más y más electrones sean promovidos a la banda de conducción desde la banda de valencia. En otras palabras, se libera un número creciente de electrones desde los enlaces covalentes en un semiconductor y quedan disponibles para la conducción. La conductividad de casi todos los metales, por el contrario, *disminuye* con una temperatura creciente. Esto es porque el número de electrones que ya están disponibles empieza a dispersarse más (es decir, una temperatura creciente reduce la movilidad).

Aun cuando el germanio (Ge), al silicio (Si) y el α -Sn tienen las mismas estructura cristalina y estructura de bandas que el diamante, sus brechas de energía son más pequeñas. De hecho, en el α -Sn es tan pequeña ($E_g = 0.1$ eV) que el α -Sn se comporta como un metal. La brecha de energía es un poco mayor en el silicio ($E_g = 1.1$ eV) y en el germanio ($E_g = 0.67$ eV); estos elementos se comportan como semiconductores. En general, se consideran a los materiales con una brecha de banda mayor a 4.0 eV como aislantes, dieléctricos o no conductores; los materiales con una brecha de banda menor a 4.0 eV son considerados como semiconductores.

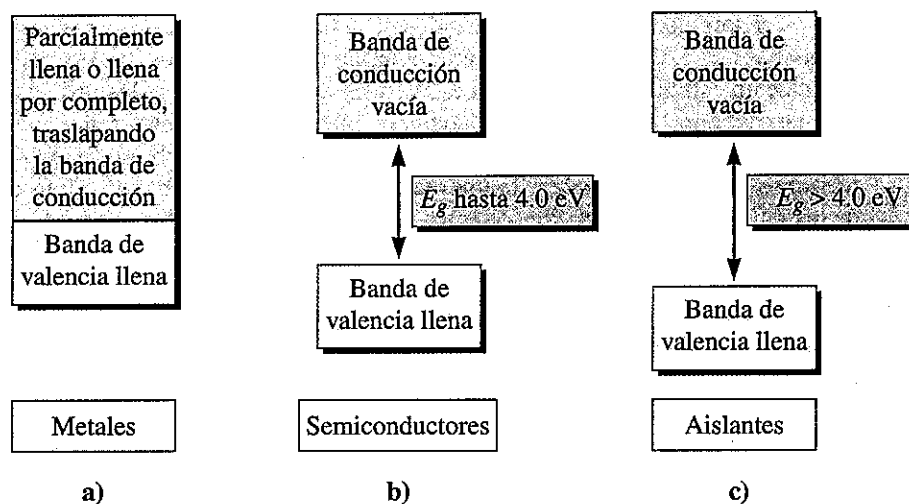


Figura 19-5 Esquema de estructuras de bandas para a) metales, b) semiconductores y c) dieléctricos o aislantes. (Se supone que la temperatura es 0 K.)

19-3 Conductividad de metales y aleaciones

La conductividad de un metal puro y sin defectos está determinada por la estructura electrónica de los átomos, pero se puede cambiar la conductividad al cambiar la movilidad, μ , de los portadores. Recuerde que la movilidad es proporcional al promedio de la velocidad de deriva $\bar{v}$. El promedio de la velocidad de deriva es la velocidad con la que los portadores de carga se mueven en la dirección dictada por el campo aplicado. Las trayectorias de electrones están influidas por campos internos debidos a átomos en el sólido e imperfecciones en la red. Cuando estos campos internos influyen en la trayectoria de un electrón, disminuye la velocidad de deriva (y, por tanto, la movilidad de los portadores de carga). La **trayectoria libre media** (λ_e) de electrones está definida como

$$\lambda_e = \tau \bar{v} \quad (19-6)$$

El tiempo promedio entre colisiones es τ . La trayectoria libre media define la distancia promedio entre colisiones; una trayectoria libre media más larga permite movilidads más altas y conductividades más altas.

Efecto de la temperatura Cuando aumenta la temperatura de un metal, la energía térmica hace que se incrementen las amplitudes de la vibración de los átomos (figura 19-6). Esto aumenta la *sección transversal de dispersión* de átomos o defectos en la red. En esencia, los átomos y defectos actúan como objetivos más grandes para las interacciones con electrones, y las interacciones ocurren con más frecuencia. Entonces, se reducen la trayectoria libre media y la movilidad de los electrones y aumenta la resistividad. El cambio en la resistividad de un metal puro como función de la temperatura puede estimarse con la ecuación

$$\rho = \rho_{RT}(1 + \alpha_R \Delta T) \quad (19-7)$$

donde ρ es la resistividad a cualquier temperatura T , ρ_{RT} es la resistividad a temperatura ambiente (es decir, 25 °C), $\Delta T = (T - T_{RT})$ es la diferencia entre la temperatura de interés y la temperatura ambiente, y α_R es el *coeficiente de resistividad por temperatura*. La relación entre resistividad y temperatura es lineal en un amplio margen de temperaturas (figura 19-7). En la tabla 19-3 se dan ejemplos del coeficiente de resistividad por temperatura.

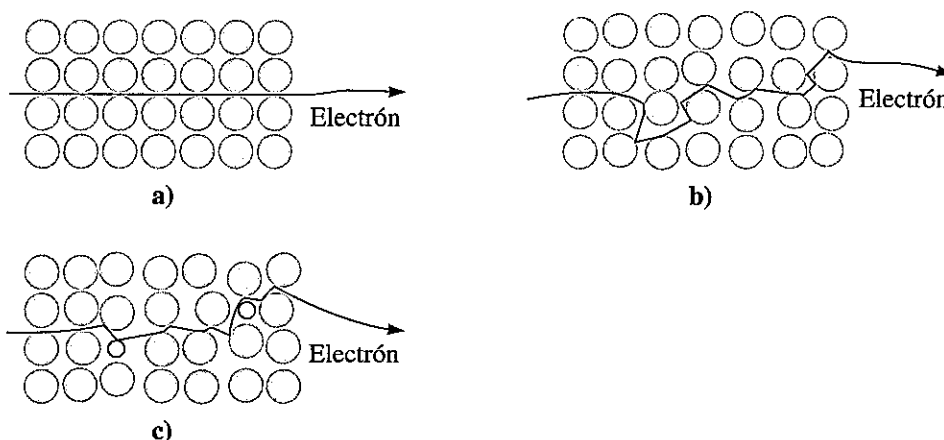


Figura 19-6 Movimiento de un electrón en a) un cristal perfecto, b) un cristal calentado a alta temperatura, y c) un cristal que contiene defectos a nivel atómico. La dispersión de los electrones reduce la movilidad y la conductividad.

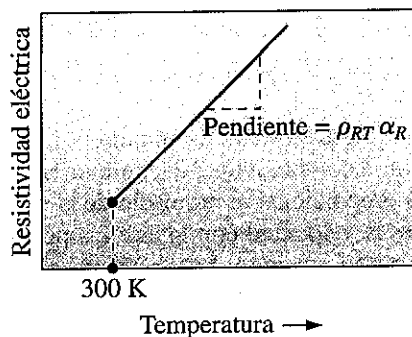


Figura 19-7

Efecto de la temperatura en la resistividad eléctrica de un metal con estructura cristalina perfecta.

TABLA 19-3 ■ Coeficiente de resistividad por temperatura α_R para metales seleccionados

Metal	Resistividad a temperatura ambiente (ohm · cm)	Coeficiente de resistividad por temperatura (α_R) [ohm/(ohm · °C)]
Be	4.0×10^{-6}	0.0250
Mg	4.45×10^{-6}	0.0037
Ca	3.91×10^{-6}	0.0042
Al	2.65×10^{-6}	0.0043
Cr	12.90×10^{-6} (0 °C)	0.0030
Fe	9.71×10^{-6}	0.0065
Co	6.24×10^{-6}	0.0053
Ni	6.84×10^{-6}	0.0069
Cu	1.67×10^{-6}	0.0043
Ag	1.59×10^{-6}	0.0041
Au	2.35×10^{-6}	0.0035
Pd	10.8×10^{-6}	0.0037
W	5.3×10^{-6} (27 °C)	0.0045
Pt	9.85×10^{-6}	0.0039

(HANDBOOK OF ELECTROMAGNETIC MATERIALS: MONOLITHIC AND COMPOSITE VERSIONS AND THEIR APPLICATIONS por P. S. Neelkanta. Copyright 1995 por TAYLOR & FRANCIS GROUP LLC - BOOKS.

Reproducida con permiso de TAYLOR & FRANCIS GROUP LLC - BOOKS en el formato de libro de texto vía el Copyright Clearance Center).

El siguiente ejemplo ilustra la forma en que puede calcularse la resistividad del cobre puro.

Ejemplo 19-3

Resistividad del cobre puro

Calcule la conductividad eléctrica del cobre puro a a) 400 °C y b) -100 °C.

SOLUCIÓN

La resistividad del cobre a temperatura ambiente es 1.67×10^{-6} ohm · cm, y el coeficiente de resistividad por temperatura es 0.0043 ohm/(ohm · °C). (Véase la tabla 19-3.)

a) A 400 °C:

$$\rho = \rho_{RT} (1 + \alpha_R \Delta T) = (1.67 \times 10^{-6}) [1 + 0.0043(400 - 25)]$$

$$\rho = 4.363 \times 10^{-6} \text{ ohm} \cdot \text{cm}$$

$$\sigma = 1/\rho = 2.29 \times 10^5 \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$$

b) A $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\rho = (1.67 \times 10^{-6})[1 + 0.0043(-100 - 25)] = 7.724 \times 10^{-7} \text{ ohm} \cdot \text{cm}$$

$$\sigma = 12.9 \times 10^5 \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$$

Efecto de imperfecciones a nivel atómico Las imperfecciones en estructuras de cristal dispersan electrones, reduciendo la movilidad y la conductividad del metal [figura 19-6c]. Por ejemplo, el aumento en la resistividad debido a átomos en una solución sólida para soluciones diluidas es

$$\rho_d = b(1 - x)x \quad (19-8)$$

donde ρ_d es el aumento en resistividad debida a los defectos, x es la fracción atómica de la impureza o átomos de solución sólida presentes y b es el coeficiente de resistividad de los defectos. Del mismo modo, las vacancias, dislocaciones y límites de grano reducen la conductividad del metal. Cada uno de los defectos contribuye al aumento en la resistividad del metal. Entonces, la resistividad total es

$$\rho = \rho_T + \rho_d \quad (19-9)$$

donde ρ_d es igual a las aportaciones de todos los defectos. La ecuación 19-9 se conoce como **regla de Matthiessen**. El efecto de las imperfecciones es *independiente* de la temperatura (figura 19-8).

Efecto del procesamiento y del endurecimiento Los mecanismos de endurecimiento y las técnicas de procesamiento de los metales afectan las propiedades eléctricas de un metal en diferentes formas (tabla 19-4). El endurecimiento por solución sólida *no* es una buena forma de obtener alta resistencia en metales destinados a tener altas conductividades. Las trayectorias libres medias son cortas debido a la distribución aleatoria de los átomos intersticiales o sustitucionales. La figura 19-9 presenta el efecto del zinc y otros elementos de aleación en la conductividad del cobre; cuando aumenta la cantidad de un elemento de aleación, la conductividad se reduce en forma considerable.

El endurecimiento por envejecimiento y por dispersión reduce la conductividad menos que el endurecimiento por solución sólida, porque hay una trayectoria libre media más larga entre precipitados, en comparación con la trayectoria entre defectos puntuales. El endurecimiento por deformación y el control del tamaño de grano tienen incluso menos efecto sobre la conductividad (figura 19-9 y tabla 19-4). Como las dislocaciones y los límites de grano están más alejados entre sí que los átomos de solución sólida, hay grandes volúmenes de metal que tienen una trayectoria libre media larga. En consecuencia, el trabajo en frío es una forma eficiente de aumentar la resistencia de un conductor metálico sin afectar gravemente las propiedades eléctricas del material. Además, los efectos del trabajo en frío en la conductividad pueden ser eliminados por medio de un tratamiento térmico de recuperación a baja temperatura, con el cual se restaura la buena conductividad al mismo tiempo que se retiene la resistencia.

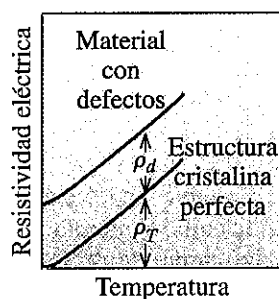


Figura 19-8

La resistividad eléctrica de un metal se debe a una aportación constante de imperfecciones ρ_d y una aportación de la temperatura variable ρ_T .

TABLA 19-4 ■ Efecto de la aleación, del endurecimiento y de las técnicas de procesamiento en la conductividad eléctrica del cobre y sus aleaciones

Aleación	$\frac{\sigma_{\text{aleación}}}{\sigma_{\text{Cu}}} \times 100$	Observaciones
Cobre recocido puro	100	Pocos defectos para dispersar electrones; la trayectoria libre media es larga.
Cobre puro deformado 80%	98	Numerosas dislocaciones, pero debido a la naturaleza enredada de las redes de dislocaciones, la trayectoria libre media todavía es larga.
Cu-0.7% Al_2O_3 endurecido por dispersión	85	La fase dispersa no está tan compactada como los átomos de solución sólida, ni es coherente, como en el endurecimiento por envejecimiento. Entonces, el efecto en la conductividad es pequeño.
Cu-2% Be tratado por solución	18	La aleación es de una fase, pero la pequeña cantidad de endurecimiento por solución sólida del berilio supersaturado reduce en gran medida la conductividad.
Cu-2% Be envejecido	23	Durante el endurecimiento, el berilio sale de la red de cobre para producir un precipitado coherente. El precipitado no interfiere con la conductividad tanto como los átomos de solución sólida.
Cu-35% Zn	28	Esta aleación es una solución sólida endurecida por zinc, que tiene un radio atómico cercano al del cobre. La conductividad es baja, pero no tanto como cuando el berilio está presente.

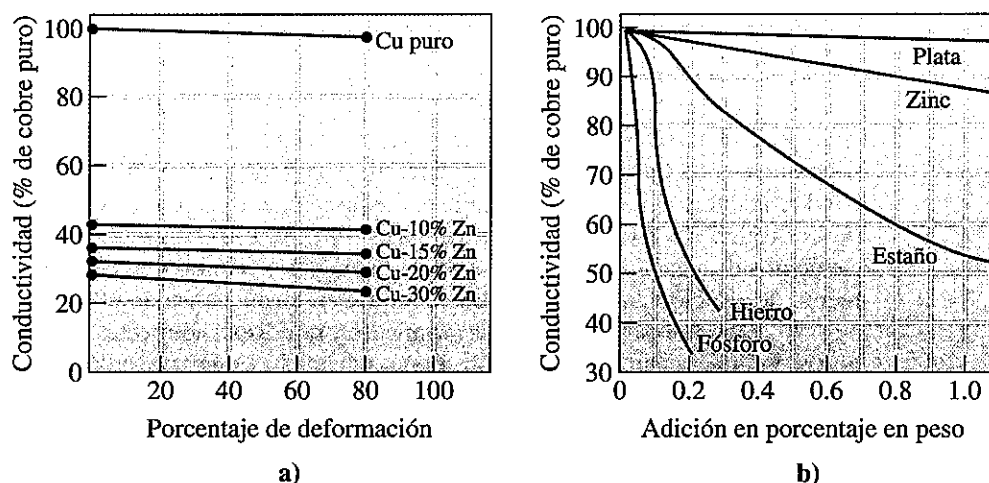


Figura 19-9 a) Efecto del endurecimiento por solución sólida y por trabajo en frío en la conductividad eléctrica del cobre, y b) efecto de la adición de elementos seleccionados en la conductividad eléctrica del cobre.

Conductividad de aleaciones En general, las aleaciones tienen resistividades más altas que los metales puros por la dispersión de electrones debida a las aleaciones agregadas. Por ejemplo, la resistividad del Cu puro a temperatura ambiente es $\sim 1.67 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ y la del oro puro es $\sim 2.35 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$. La resistividad de una aleación de 35% Au-65% Cu a temperatura ambiente es mucho más alta, $\sim 12 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$. Un tratamiento térmico puede ordenar átomos en aleaciones para reducir la resistividad. En comparación con metales puros, la resistividad de aleaciones tiende a ser estable respecto a variaciones en temperatura. Las aleaciones de resistencia relativamente alta como el nicromo ($\sim 80\% \text{ Ni}-20\% \text{ Cr}$) pueden usarse como elementos calefactores. Ciertas aleaciones de Bi-Sn-Pb-Cd se usan para hacer fusibles eléctricos debido a sus bajas temperaturas de fusión.

19-4 Semiconductores

En el grupo 4B de la tabla periódica se encuentran los semiconductores elementales entre los cuales están el germanio y el silicio. Los semiconductores compuestos están formados por elementos de los grupos 2B y 6B de la tabla periódica (por ejemplo, CdS, CdSe, CdTe, HgCdTe, etc.) y se conocen como semiconductores II-VI (dos seis). También pueden formarse al combinar elementos de los grupos 3B y 5B de la tabla periódica (por ejemplo, GaN, GaAs, AlAs, AlP, InP, etc.). Éstos se conocen como semiconductores III-V (tres cinco).

Un **semiconductor intrínseco** es aquel con propiedades que no están controladas por sus impurezas. Un **semiconductor extrínseco** (tipo *n* o *p*) es el preferido para dispositivos, ya que sus propiedades son estables en función de la temperatura y pueden ser controlados usando implantaciones de iones o difusión de impurezas conocidas como dopantes o adyuvantes. Los materiales semiconductores, incluyendo al silicio y al germanio, son los elementos para la fabricación de numerosos dispositivos electrónicos. Estos materiales tienen una conductividad que se puede controlar con facilidad y, cuando se combinan en forma apropiada, pueden actuar como interruptores, amplificadores o como dispositivos para almacenar información. Las propiedades de algunos de los semiconductores que se encuentran con más frecuencia aparecen en la tabla 19-5.

Como ya se vio en la sección 19-2, cuando los átomos de un semiconductor se unen para formar un sólido, se forman dos bandas de energía [figura 19-5b]. A 0 K, los niveles de energía de la banda de valencia están completamente llenos, ya que estos son los estados de energía más bajos para los electrones. La banda de valencia se separa de la banda de conductividad por una brecha de banda. A 0 K, la banda de conducción está vacía.

La brecha de energía E_g entre las bandas de valencia y de conducción en semiconductores es relativamente pequeña (figura 19-5). Entonces, cuando aumenta la temperatura, algunos electrones poseen suficiente energía térmica para ser promovidos de la banda de valencia a la banda de conducción. Los electrones excitados dejan tras de sí niveles de energía desocupados, u orificios, en la banda de valencia. Cuando un electrón se mueve para llenar un orificio, se forma otro orificio; en consecuencia, los orificios parecen actuar como electrones de carga positiva y llevan una carga eléctrica. Cuando se aplica un voltaje al material, los electrones de la banda de conducción aceleran hacia el terminal positivo, en tanto que los orificios de la banda de valencia se mueven hacia el terminal negativo (figura 19-10). La corriente es, por tanto, conducida por el movimiento tanto de electrones como de orificios.

TABLA 19-5 ■ Propiedades de semiconductores de uso común a temperatura ambiente

Semiconductor	Brecha de banda (eV)	Movilidad de electrones (μ_n) ($\frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$)	Movilidad de orificios (μ_p) ($\frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$)	Constante dieléctrica (k)	Resistividad ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Densidad ($\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$)	Temperatura de fusión ($^{\circ}\text{C}$)
Silicio (Si)	1.11	1350	480	11.8	2.5×10^5	2.33	1415
Silicio amorfo (a:Si:H)	1.70	1	10^{-2}	~11.8	10^{10}	~2.30	—
Germanio (Ge)	0.67	3900	1900	16.0	43	5.32	936
SiC (α)	2.86	500		10.2	10^{10}	3.21	2830
Arseniuro de galio (GaAs)	1.43	8500	400	13.2	4×10^8	5.31	1238
Diamante	~5.50	1800	1500	5.7	$> 10^{18}$	3.52	~3550

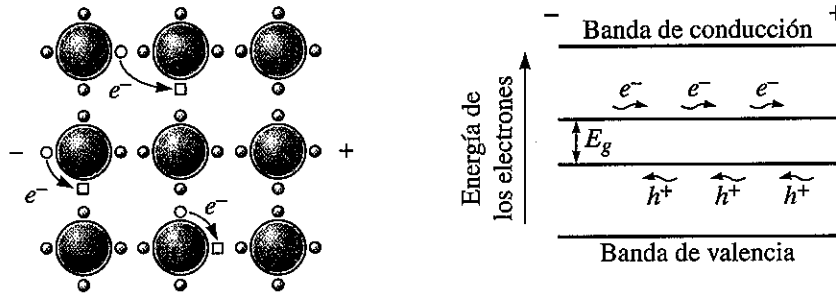


Figura 19-10 Cuando a un semiconductor se le aplica un voltaje, los electrones se mueven a través de la banda de conducción, en tanto que los orificios se mueven a través de la banda de valencia en la dirección opuesta.

La conductividad está determinada por el número de electrones y orificios de acuerdo con la ecuación

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p \quad (19-10)$$

donde n es la concentración de electrones en la banda de conducción, p es la concentración de orificios en la banda de valencia y μ_n y μ_p son las movilidades de electrones y orificios, respectivamente (tabla 19-5). Esta ecuación es la misma que la 19-5b.

En semiconductores intrínsecos, por cada electrón promovido a la banda de conducción, hay un orificio que se deja en la banda de valencia, tal que

$$n_i = p_i$$

donde n_i y p_i son las concentraciones de electrones y orificios, respectivamente, en un semiconductor intrínseco. Por tanto, la conductividad de un semiconductor intrínseco es

$$\sigma = qn_i(\mu_n + \mu_p) \quad (19-11)$$

En semiconductores intrínsecos, se controla el número de portadores de carga y, en consecuencia, la conductividad eléctrica al controlar la temperatura. A la temperatura de cero absoluto, todos los electrones están en la banda de valencia, mientras que todos los niveles de la banda de conducción están desocupados [figura 19-11a)]. Cuando aumenta la temperatura, hay una mayor probabilidad de que un nivel de energía de la banda de conducción sea ocupado (e igual probabilidad de que un nivel de la banda de valencia sea desocupado, o que un orificio se encuentre presente) [figura 19-11b)]. El número de electrones en la banda de conducción, que es igual al número de orificios en la banda de valencia, está dado por

$$n = n_i = p_i = n_0 \exp\left(\frac{-E_g}{2k_B T}\right) \quad (19-12a)$$

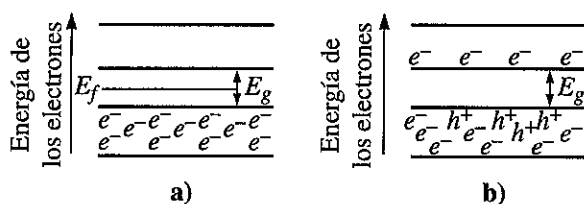


Figura 19-11
Distribución de electrones y orificios en las bandas de valencia y de conducción a) al cero absoluto y b) a una temperatura elevada.

donde n_0 está dado por

$$n_0 = 2 \left(\frac{2\pi k_B T}{h^2} \right)^{3/2} (m_n^* m_p^*)^{3/4} \quad (19-12b)$$

En estas ecuaciones, k y h son las constantes de Boltzmann y de Planck y m_n^* y m_p^* son las masas efectivas de electrones y orificios en el semiconductor, respectivamente. Las masas efectivas explican los efectos de las fuerzas internas que alteran la aceleración de los electrones en un sólido con respecto a los electrones en un vacío. Para el Ge, Si y GaAs, los valores de temperatura ambiente de n_i son 2.5×10^{13} , 1.5×10^{10} y 2×10^6 electrones/cm³, respectivamente. El producto $n_i p_i$ permanece constante a cualquier temperatura dada para un semiconductor determinado. Esto permite calcular valores de n_i o p_i a diferentes temperaturas.

Las temperaturas más elevadas permiten que más electrones crucen la zona prohibida y, por tanto, aumenta la conductividad:

$$\sigma = n_0 q (\mu_n + \mu_p) \exp \left(\frac{-E_g}{2k_B T} \right) \quad (19-13)$$

Observe que tanto n_i como σ están relacionadas con la temperatura por una ecuación de Arrhenius, $\sigma = A \exp \left(\frac{-Q}{RT} \right)$. Cuando aumenta la temperatura, la conductividad de un semiconductor también se incrementa porque habrá más portadores para la conducción. Nótese que, en cuanto a metales se refiere, las movilidades de los portadores disminuyen a temperaturas elevadas, pero ésta es una dependencia mucho más débil que el aumento exponencial en el número de portadores de carga. El incremento en la conductividad con la temperatura en semiconductores hace un fuerte contraste con la disminución en la conductividad de metales con una temperatura creciente (figura 19-12). Incluso a altas temperaturas, no obstante, la conductividad de un metal es de varios órdenes de magnitud mayor que la conductividad de un semiconductor. El ejemplo que sigue muestra el cálculo para determinar la concentración de portadores en un semiconductor intrínseco.

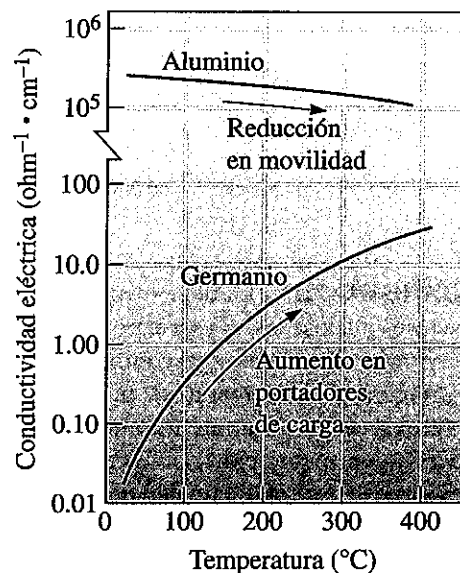


Figura 19-12
Conductividad eléctrica contra temperatura para semiconductores intrínsecos, en comparación con metales. Nótese la ruptura de la escala del eje vertical.

Ejemplo 19-4**Concentraciones de portadores en Ge intrínseco**

Para el germanio a 25 °C, estime a) el número de portadores de carga, b) la fracción del total de electrones de la banda de valencia excitados para pasar a la banda de conducción, y c) la constante n_0 de la ecuación 19-12a.

SOLUCIÓN

De la tabla 19-5, $\rho = 43 \Omega \cdot \text{cm}$, $\therefore \sigma = 0.0233 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$

También, de la tabla 19-5,

$$E_g = 0.67 \text{ eV}, \mu_n = 3900 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}, \mu_p = 1900 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

$$2k_B T = (2)(8.63 \times 10^{-5} \text{ eV/K})(273 + 25) = 0.05143 \text{ eV a } T = 25^\circ \text{C}$$

a) De la ecuación 19-10,

$$n = \frac{\sigma}{q(\mu_n + \mu_p)} = \frac{0.0233}{(1.6 \times 10^{-19})(3900 + 1900)} = 2.51 \times 10^{13} \frac{\text{electrones}}{\text{cm}^3}$$

Hay 2.51×10^{13} electrones/cm³ y 2.51×10^{13} orificios/cm³ que conducen carga en el germanio a temperatura ambiente.

b) El parámetro de red del germanio cúbico tipo diamante es $5.6575 \times 10^{-8} \text{ cm}$.

El número total de electrones de la banda de valencia del germanio a 0 K es

$$\begin{aligned} \text{Total de electrones} &= \frac{(8 \text{ átomos/celda})(4 \text{ electrones/átomo})}{(5.6575 \times 10^{-8} \text{ cm})^3} \\ &= 1.77 \times 10^{23} \end{aligned}$$

$$\text{Fracción excitada} = \frac{2.51 \times 10^{13}}{1.77 \times 10^{23}} = 1.42 \times 10^{-10}$$

c) De la ecuación 19.12a,

$$\begin{aligned} n_0 &= \frac{n}{\exp(-E_g/2k_B T)} = \frac{2.51 \times 10^{13}}{\exp(-0.67/0.05143)} \\ &= 1.14 \times 10^{19} \text{ portadores/cm}^3 \end{aligned}$$

Semiconductores extrínsecos

La dependencia en la temperatura, que tiene la conductividad en semiconductores intrínsecos, es casi exponencial pero no es útil para aplicaciones prácticas. No se puede controlar con precisión el comportamiento de un semiconductor intrínseco porque ligeras variaciones en temperatura pueden cambiar de manera importante la conductividad. Al agregar intencionalmente un pequeño número de átomos de impurezas al material (procedimiento conocido como dopado o adulteración), es posible producir un semiconductor extrínseco. La conductividad del semiconductor extrínseco depende principalmente del número de átomos de impurezas, o dopante, y en cierto margen de temperatura es independiente de la temperatura. Esta capacidad de tener una conductividad ajustable, independiente de la temperatura, es la razón por la que casi siempre se usan semiconductores extrínsecos para fabricar dispositivos.

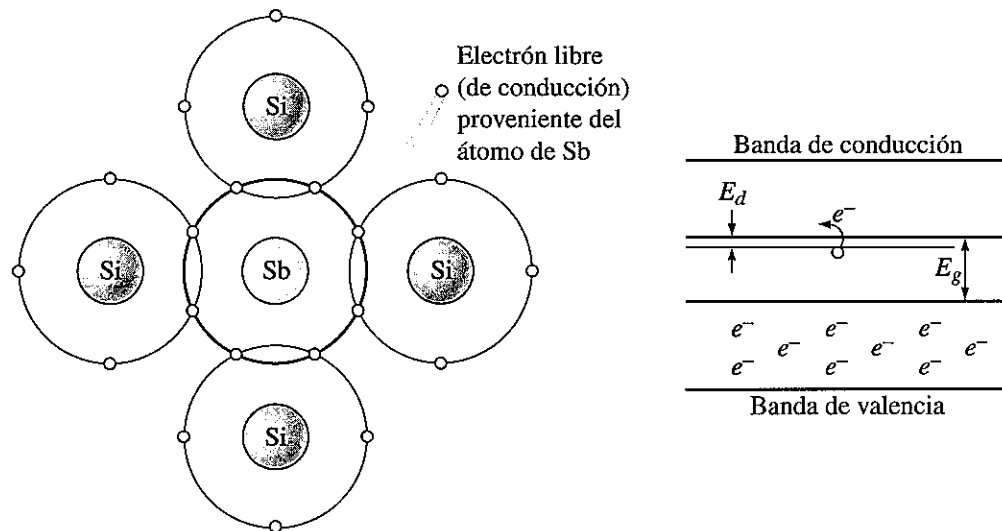


Figura 19-13 Cuando al silicio se le agrega un átomo dopante con valencia mayor a cuatro, se introduce un electrón adicional y se crea un estado donador de energía. Ahora los electrones se excitan más fácilmente hacia la banda de conducción.

Semiconductores tipo *n* Suponga que al silicio o al germanio se agrega un átomo de impureza, por ejemplo de antimonio, que tiene una valencia de cinco. Cuatro de los electrones del átomo de antimonio participan en el proceso de enlace covalente, en tanto que el electrón adicional entra a un nivel de energía justo por debajo de la banda de conducción (figura 19-13). Como el electrón adicional no está enlazado fuertemente a los átomos, sólo se requiere de un pequeño aumento en energía, E_d , para que el electrón entre a la banda de conducción. Un dopante tipo *n* “dona” un electrón libre por cada impureza agregada. La brecha de energía que controla la conductividad es ahora E_d en lugar de E_g (tabla 19-6). No se crean orificios correspondientes cuando los electrones donantes entran a la banda de conducción. Se da el caso de que pares electrón-orificio son creados cuando la energía térmica hace que los electrones sean promovidos a la banda de conducción desde la banda de valencia; no obstante, el número de pares electrón-orificio es de importancia sólo a altas temperaturas.

Semiconductores tipo *p* Cuando al Si o al Ge se le agrega una impureza de galio o de boro, que tiene una valencia de tres, no hay suficientes electrones para completar el proceso de enlace covalente. Se crea un orificio en la banda de valencia que puede ser llenado por electrones desde otros lugares de la banda (figura 19-14). Los orificios actúan como “aceptantes” de electrones. Estos lugares de orificios tienen una energía un poco más alta de lo normal y crean un nivel aceptante de posibles energías de electrones justo arriba de la banda de valencia (tabla 19-6). Un electrón debe ganar una energía de sólo E_a para crear un orificio en la banda de valencia. El orificio entonces porta energía. Éste se conoce como semiconductor tipo *p*.

Neutralidad de carga En un semiconductor extrínseco, tiene que haber neutralidad eléctrica generalizada. De este modo, la suma del número de átomos donantes (N_d) y de orificios por unidad de volumen (p_{ext}) (ambos están cargados positivamente) es igual al número de átomos aceptantes (N_a) y electrones por unidad de volumen (n_{ext}) (ambos están cargados negativamente):

$$p_{\text{ext}} + N_d = n_{\text{ext}} + N_a$$

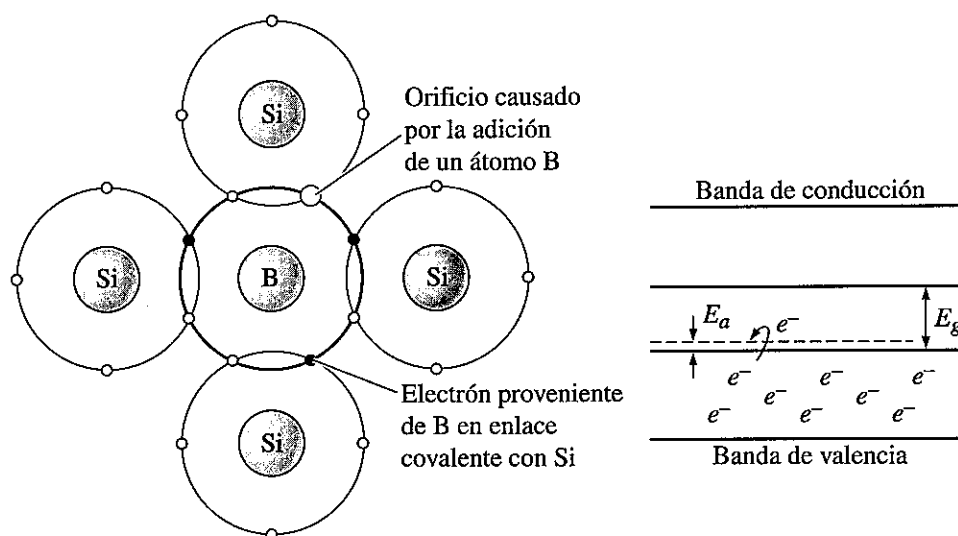


Figura 19-14 Cuando un átomo dopante con valencia de menos de cuatro es sustituido en la estructura de silicio, se introduce un orificio en la estructura y se crea un nivel de energía aceptante justo arriba de la banda de valencia.

TABLA 19-6 ■ Niveles de energía donantes y aceptantes (en electrón volts) cuando se contaminan semiconductores de silicio y germanio

Dopante	Silicio		Germanio	
	E_d	E_a	E_d	E_a
P	0.045		0.0120	
As	0.049		0.0127	
Sb	0.039		0.0096	
B		0.045		0.0104
Al		0.057		0.0102
Ga		0.065		0.0108
In		0.160		0.0112

En esta ecuación, n_{ext} y p_{ext} son las concentraciones de electrones y orificios en un semiconductor extrínseco.

Si el semiconductor extrínseco es tipo n fuertemente dopante (es decir, $N_d \gg n_i$), entonces $n_{\text{ext}} \sim N_d$. Del mismo modo, si hay un semiconductor aceptante fuertemente dopante (tipo p), entonces $N_a \gg p_i$ y entonces $p_{\text{ext}} \sim N_a$. Esto es importante, porque nos dice que al agregar una cantidad considerable de dopante, se puede dominar la conductividad de un semiconductor si se controla la concentración del dopante. Ésta es la razón por la cual los semiconductores son más útiles para fabricar dispositivos controlables, por ejemplo transistores.

En la figura 19-15 se ven los cambios en la concentración de portadores por efecto de la temperatura. A partir de esto, los cambios en conductividad aproximada en un semiconductor extrínseco son fáciles de seguir. Cuando la temperatura es demasiado baja, los átomos donantes o aceptantes no están ionizados y por tanto la conductividad es muy pequeña. Cuando la temperatura empieza a aumentar, los electrones (u orificios) aportados por los donantes (o aceptantes) estarán disponibles para la conducción. A temperaturas suficientemente elevadas, la conductividad es casi independiente de la temperatura (región etiquetada

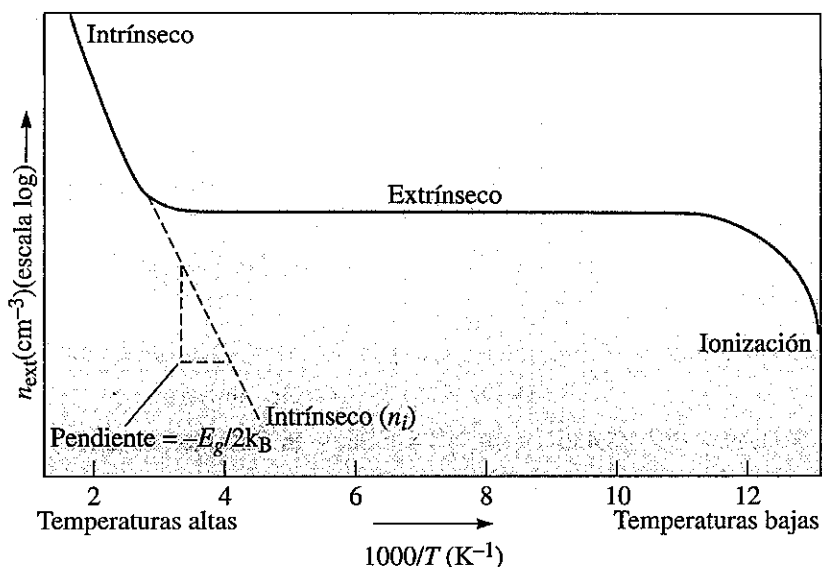


Figura 19-15 Efecto de la temperatura sobre la concentración de portadores de un semiconductor tipo n . A temperaturas bajas, los átomos donadores o aceptantes no están ionizados. A medida que se incrementa la temperatura, se completa el proceso de ionización y la concentración de portadores aumenta hasta un nivel determinado por el grado de dopado. La conductividad entonces se conserva esencialmente sin cambio, hasta que la temperatura llega a un nivel tan elevado que los portadores generados térmicamente empiezan a dominar. El efecto de los contaminantes se pierde a temperaturas muy elevadas y el semiconductor presenta, en general, un comportamiento "intrínseco".

como extrínseca). El valor de la conductividad en el que la meseta ocurre depende del nivel de dopado. Cuando la temperatura llega a ser demasiada alta, el comportamiento se parece al de un semiconductor intrínseco a partir de que el efecto de los dopantes en esencia está perdido. En este análisis no se consideraron los efectos de la concentración de dopantes en la movilidad de electrones y orificios y la dependencia de temperatura de la brecha de banda. A muy altas temperaturas (no mostradas en la figura 19-15), la conductividad *disminuye* de nuevo conforme la dispersión de transportadores domina.

Ejemplo 19-5

Diseño de un semiconductor

Diseñe un semiconductor tipo p con base de silicio, que proporcione una conductividad constante de $100 \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ en un intervalo de temperaturas. Compare la concentración necesaria de átomos aceptantes en Si con la concentración de átomos de Si.

SOLUCIÓN

Para obtener la conductividad deseada, se debe contaminar el silicio con átomos que tengan una valencia de +3, agregando suficiente contaminante (dopante) con el fin de obtener el número requerido de portadores de carga. Si se supone que el número de portadores intrínsecos es pequeño en comparación con la concentración contaminante, entonces

$$\sigma = N_a q \mu_p$$

donde $\sigma = 100 \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ y $\mu_p = 480 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. Nótese que las movilidades de electrones y orificios son propiedades del material anfitrión (es decir, silicio en este caso) y no de la especie contaminante. Si se recuerda que un coulomb puede expresarse como ampere-segundos y el voltaje como ampere-ohm, el número de portadores de carga necesarios es

$$N_a = \frac{\sigma}{q\mu_p} = \frac{100}{(1.6 \times 10^{-19})(480)} = 1.30 \times 10^{18} \text{ átomos aceptantes/cm}^3$$

Suponga que la constante de red del Si permanece sin cambio como resultado de la contaminación:

$$N_a = \frac{(1 \text{ orificio/átomo dopante})(x \text{ átomos dopantes/átomos de Si})(8 \text{ átomos de Si/celda unitaria})}{(5.4307 \times 10^{-8} \text{ cm})^3/\text{celda unitaria}}$$

$$x = (1.30 \times 10^{18})(5.4307 \times 10^{-8})^3/8 = 26 \times 10^{-6} \text{ átomos dopantes/átomo de Si}$$

o 26 átomos dopantes/ 10^6 átomos de Si

Los dopantes posibles incluyen el boro, aluminio, galio e indio. Los químicos de alta pureza y en condiciones ambientales limpias son esenciales para el procesamiento, dado que se requieren 26 átomos contaminantes en un millón de átomos de silicio.

Muchos otros materiales que normalmente son aislantes (porque la brecha de banda es demasiado grande) se pueden hacer semiconductores si se les contamina. Ejemplos de esto incluyen el BaTiO_3 , ZnO , TiO_2 y muchos otros óxidos. Entonces, el concepto de contaminantes tipo *n* y tipo *p* no se limita al Si, Ge, GaAs, etc. Es posible contaminar BaTiO_3 , por ejemplo, y hacer BaTiO_3 tipo *n* o tipo *p*. Estos materiales son útiles para numerosas aplicaciones como son los **termistores**.

Semiconductores de brecha de banda directa e indirecta

En un semiconductor de brecha de banda directa, un electrón puede ser promovido desde la banda de conducción a la banda de valencia sin cambiar el momento del electrón. Un ejemplo de un semiconductor de brecha de banda directa es el GaAs. Cuando el electrón excitado regresa a la banda de valencia, electrones y orificios se combinan para producir luz. Esto se conoce como **recombinación radiante**. Entonces, materiales de brecha de banda directa como el GaAs y soluciones sólidas de éstos (por ejemplo GaAs-AlAs, etc.) se usan para hacer diodos emisores de luz (LED) de diferentes colores. La brecha de banda de semiconductores puede ajustarse usando soluciones sólidas. El cambio en brecha de banda produce un cambio en la longitud de onda (es decir, la frecuencia del color (ν) está relacionada con la brecha de banda E_g cuando $E_g = h\nu$, donde h es la constante de Planck). Como se obtiene un efecto óptico usando un material electrónico, a veces los materiales de brecha de banda directa se conocen como materiales optoelectrónicos (capítulo 21). Muchos dispositivos láser y LED se han perfeccionado usando estos materiales. Los LED que emiten luz en la escala infrarroja se usan en sistemas de comunicaciones por fibras ópticas, para convertir ondas de luz en pulsos eléctricos. Equipos láser de colores diferentes, por ejemplo el láser azul que usa GaN, se han desarrollado usando materiales de brecha de banda directa.

En un semiconductor de brecha de banda indirecta (por ejemplo Si, Ge y GaP), los electrones no pueden ser promovidos a la banda de valencia sin un cambio en su momento. Como consecuencia, en materiales que tienen una brecha de banda indirecta (por ejemplo el silicio), no es posible obtener emisión de luz. En cambio, electrones y orificios se combinan para producir calor que se disipa dentro del material. Esto se conoce como **recombinación no radiante**. Nótese que tanto los materiales con brecha de banda directa e indirecta pueden ser contaminados para formar semiconductores tipo *n* o tipo *p*.

19-5 Aplicaciones de los semiconductores

Se fabrican diodos, transistores, láseres y LED usando semiconductores. La **unión p - n** se utiliza en muchos de estos dispositivos, tales como transistores. La creación de una región tipo n en un semiconductor tipo p (o viceversa) forma una unión p - n [figura 19-16a)]. La región tipo n contiene un número relativamente grande de electrones libres, mientras que la región tipo p contiene un número relativamente grande de orificios libres. Este gradiente de concentración ocasiona la difusión de electrones desde el material tipo n al material tipo p , así como difusión de orificios del material tipo p al material tipo n . En la unión donde se unen las regiones p y n , electrones libres del material tipo n se recombinan con orificios en el material tipo p . Esto crea una **región agotada** en la unión donde es bajo el número de portadores de carga disponibles y, en esta forma, la resistividad es alta. En consecuencia, se desarrolla un campo eléctrico debido a la distribución de iones positivos expuestos en el lado n de la unión y los iones negativos expuestos en el lado p de la unión. El campo eléctrico impide más difusión.

Desde el punto de vista eléctrico, la unión p - n está conduciendo cuando el lado p está conectado a un voltaje positivo. Esta **polarización directa** se muestra en la figura 19-16a). El voltaje aplicado directamente neutraliza el campo eléctrico en la región agotada, haciendo posible que los electrones del lado n se difundan por la región agotada, hacia el lado p . Cuando se aplica una polarización negativa al lado p de una unión p - n (**polarización inversa**), la unión p - n no permite que pase mucha corriente. La región agotada, simplemente se hace más grande porque queda más vacía de portadores. Cuando no se aplica polarización, no hay corriente que pase por la unión p - n . La corriente directa puede ser de hasta unos pocos miliamperes, en tanto que la corriente de polarización inversa es de unos pocos nanoamperes.

Las curvas características de corriente-voltaje (I - V) de una unión p - n se ilustran en la figura 19-16b). Como la unión p - n permite que pase corriente sólo en una dirección, pasa sólo la mitad de una corriente alterna, por lo cual convierte la corriente alterna en corriente directa [figura 19-6c)]. Estas uniones se llaman **diodos rectificadores**.

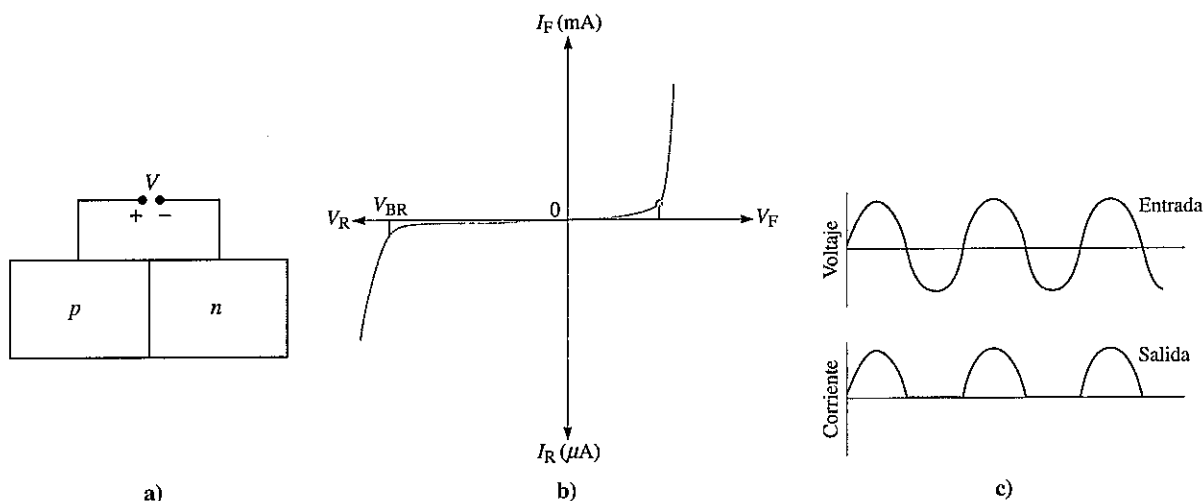


Figura 19-16 a) Una unión p - n bajo polarización directa. b) Curva característica para una unión p - n . Nótese las diferentes escalas en los cuadrantes primero y tercero. A voltajes de polarización inversa suficientemente altos, ocurre una "ruptura" y pueden pasar grandes corrientes. Por lo general esto destruye los dispositivos. c) Si se aplica una señal alterna, ocurre una rectificación y sólo la mitad de la señal de entrada pasa por el rectificador. (Fuente: Floyd, Thomas L., *Electronic Devices (Conventional Flow Version)*, 6th, © 2002. Electrónicamente reproducida con permiso de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.)

Transistores de unión bipolar Hay dos tipos de transistores basados en uniones $p-n$. El término transistor se deriva de dos palabras “transferencia” y “resistor”. Un transistor se puede usar como interruptor o como amplificador. Un tipo de transistor es el *transistor de unión bipolar* (TUB). En la era de grandes computadoras, los transistores de unión bipolar se usaban con frecuencia en unidades de procesamiento central. Un transistor de unión bipolar es un emparedado ya sea de materiales semiconductores $n-p-n$ o $p-n-p$, como se ve en la figura 19-17a). Hay tres zonas en el transistor: el emisor, la base y el colector. Al igual que en la unión $p-n$, los electrones se concentran inicialmente en el material tipo n y los orificios se concentran en el material tipo p .

La figura 19-17b) muestra un diagrama esquemático de un transistor $n-p-n$ y su circuito eléctrico. La señal eléctrica a ser amplificada se conecta entre la base y el emisor, con un pequeño voltaje entre estas dos zonas. La salida del transistor, o sea la señal amplificada, se conecta entre el emisor y el colector y opera a un voltaje más alto. El circuito se conecta de modo que se produzca una polarización directa entre el emisor y la base (el voltaje positivo está en la base tipo p), mientras que se produce una polarización inversa entre la base y el colector (con el voltaje positivo en el colector tipo n). La polarización directa hace que los electrones salgan del emisor y entren a la base.

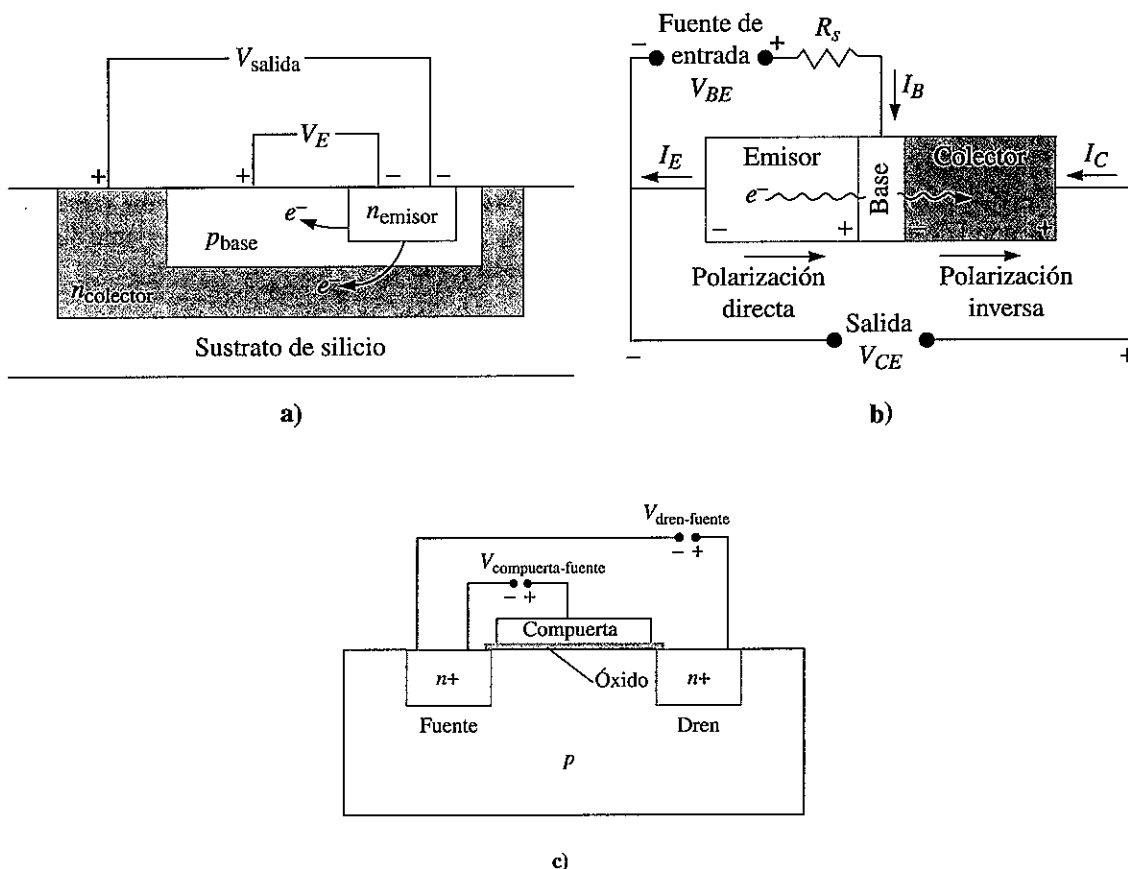


Figura 19-17 a) Bosquejo de la sección transversal del transistor. b) Un circuito para un transistor de unión bipolar $n-p-n$. La entrada crea una polarización directa e inversa que hace que los electrones se muevan del emisor, pasen por la base y penetren en el colector, creando una salida amplificada. c) Bosquejo de la sección transversal de un transistor de efecto de campo semiconductor de óxido metálico.

Los electrones y orificios tratan de recombinarse en la base; no obstante, si la base es excepcionalmente delgada y está ligeramente contaminada, o si es largo el tiempo de recombinación τ , casi todos los electrones pasan por la base y entran al colector. La polarización inversa entre la base y el colector acelera los electrones que pasan por el colector, el circuito se completa y se produce una señal de salida. La corriente que pasa por el colector (I_c) está dada por

$$I_c = I_0 \exp\left(\frac{V_E}{B}\right) \quad (19-14)$$

donde I_0 y B son constantes y V_E es el voltaje entre el emisor y la base. Si se aumenta el voltaje de entrada V_E , se produce una corriente I_c muy grande.

Transistores de efecto de campo Un segundo tipo de transistor, que se utiliza casi universalmente hoy en día para almacenar y procesar datos, es el *transistor de efecto de campo* (TEC). Un transistor de efecto de campo (o MOSFET) de semiconductor de óxido metálico (SOM), está formado por dos regiones tipo n altamente contaminadas ($n+$) en un sustrato tipo p , o dos regiones tipo p altamente contaminadas en un sustrato tipo n . (Los procesos de manufactura por los cuales se forma un dispositivo como éste se estudiarán en la sección 19-6.) Considere un MOSFET formado por dos regiones tipo n altamente contaminadas en un sustrato tipo p . Una de las regiones tipo n se denomina fuente; la segunda, se llama dren. Se aplica un potencial entre la fuente y el dren con la región del dren positiva, pero en ausencia de un tercer componente del transistor (un conductor llamado compuerta), los electrones no puede fluir desde la fuente al dren bajo la acción del campo eléctrico a través de la región tipo p de baja conductividad. La compuerta está separada del semiconductor por una delgada capa aislante de óxido y abarca la distancia entre las dos regiones tipo n . En estructuras avanzadas de dispositivos, el aislante es de sólo varias capas atómicas de grueso y comprende materiales que no son de sílice pura.

Se aplica un potencial entre la compuerta y la fuente, con la compuerta positiva. El potencial atrae electrones de la cercanía de la compuerta (y repele orificios), pero los electrones no pueden entrar a la compuerta debido a la sílice. La concentración de electrones bajo la compuerta hace que esta región (conocida como canal) sea más conductora, de modo que un gran potencial entre la fuente y el dren permite que los electrones fluyan de la fuente al dren, produciendo una señal amplificada (estado "activo"). Al cambiar el voltaje de entrada entre la compuerta y la fuente, se transforma el número de electrones en la trayectoria conductora, cambiando también de este modo la señal de salida. Cuando no se aplica voltaje a la compuerta, no hay electrones atraídos a la región entre la fuente y el dren, y no hay flujo de corriente de la fuente al dren (estado "inactivo").

19-6 Repaso general del procesamiento de un circuito integrado

Los **circuitos integrados** (CI), también conocidos como microchips, comprenden grandes números de componentes electrónicos que se han fabricado en la superficie de un material de sustrato en la forma de una oblea delgada, circular, de menos de 1 mm de grueso y de hasta 300 mm de diámetro. Dos componentes particularmente importantes que se encuentran en los CI son los transistores, que pueden servir como interruptores eléctricos, como se vio en la sección 19-5, y los **condensadores**, que pueden almacenar datos en un formato digital. Cada oblea puede contener varios cientos de chips. El bien conocido microprocesador Xeon™ de Intel es un ejemplo de un chip individual.

Cuando se ideó primero a principios de la década de 1960, un circuito integrado comprendía sólo unos pocos componentes eléctricos, mientras que los CI modernos incluyen varios miles de millones de componentes, todo en la superficie de una estampilla de correos. Las dimensiones más pequeñas de componentes de un CI (o "dispositivos") ahora se aproximan a la escala atómica. Este aumento en complejidad y sofisticación, logrado en forma simultánea con una considerable disminución en el costo por componente, ha hecho posible toda la era de la tecnología de información en la que vivimos. Sin estos logros, los teléfonos celulares, la Internet, computadoras de escritorio, aparatos para tomar imágenes en medicina y sistemas de música portátiles, por mencionar sólo unos pocos iconos de la vida contemporánea, no podrían existir. Se ha estimado que el hombre produce ahora más transistores por año que granos de arroz.

Desde la concepción de la manufactura del circuito integrado moderno, una reducción en el tamaño de los componentes individuales que contiene circuitos integrados ha sido el objetivo de investigadores y tecnologías que trabajan en este campo. Una expresión común de esta tendencia se conoce como "ley de Moore", en honor a Gordon Moore, autor de un artículo científico fundamental publicado en 1965. En ese artículo, Moore, que sería cofundador de Intel Corporation, predijo que el rápido crecimiento en el número de componentes fabricados en un chip representaba una tendencia que continuaría en gran medida en el futuro. Tenía razón, y las tendencias generales que predijo todavía son evidentes cuatro décadas después.

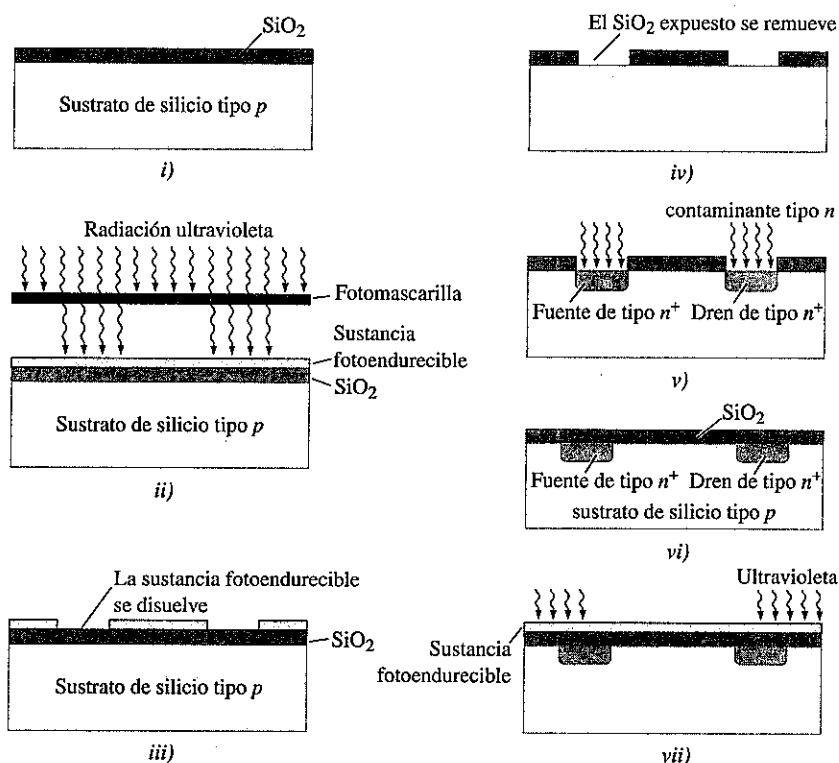
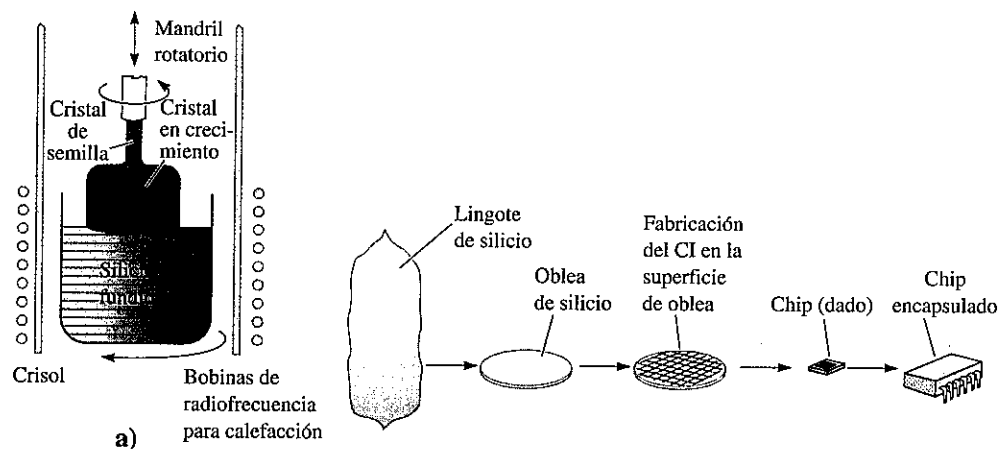
Como resultado de lo anterior, por ejemplo, vemos que el número de transistores en un microprocesador ha crecido de unos pocos miles a varios cientos de millones, mientras que los chips de memoria dinámica de acceso aleatorio (MDAA) han pasado de la marca de mil millones de transistores. Esto ha llevado a enormes avances en la capacidad de sistemas electrónicos, en especial en función del costo por dólar. Durante este tiempo, varias dimensiones de todos los componentes en un chip se han reducido, a veces en órdenes de magnitud, con algunas dimensiones ahora medidas en nanómetros. Esta escala, como se llama, impulsó y continúa impulsando la ley de Moore y termina en casi todos los aspectos del diseño y fabricación de circuitos integrados. Mantener este avance ha requerido dedicar enormes recursos, tanto financieros como humanos, dado que las herramientas del proceso de los CI (y los medios físicos en los que residen) se han perfeccionado en serie para satisfacer los desafíos de confiabilidad, produciendo características siempre más pequeñas que las anteriores.

La fabricación de circuitos integrados comprende varios cientos de pasos individuales de procesamiento y pueden ser necesarias varias semanas para realizarlos. En muchos casos, los mismos tipos de pasos de procesamiento se repiten una y otra vez, con algunas variaciones y quizá con otros pasos de procesamiento intermedios, para crear el circuito integrado. Estos "procesos unitarios" como se les ha llamado, incluyen métodos para depositar finas capas de materiales sobre un sustrato, medios para definir y crear modelos intrincados dentro de una capa de material, y métodos para introducir cantidades precisas de contaminantes (dopantes) en capas o en la superficie de la oblea. Las escalas de longitud comprendidas en algunos de estos procesos se están aproximando a dimensiones atómicas.

El equipo que se utiliza para estos procesos unitarios incluye algunos de los aparatos más refinados y costosos que se hayan diseñado, muchos de los cuales deben mantenerse en "salas limpias", caracterizadas por niveles de polvo y contaminación de órdenes de magnitud más bajas que las que se encuentran en una sala de operaciones quirúrgicas. Una instalación moderna para la fabricación de los CI puede requerir de varios miles de millones de dólares de gasto de capital en su construcción, así como de mil personas o más para operarla.

Es frecuente que las obleas de silicio se crezcan usando la técnica de crecimiento de Czochralski [figura 19-18a)]. Se utiliza un pequeño cristal de semilla para crecer monocristales de silicio muy grandes. El cristal de semilla se hace girar con gran lentitud, se inserta y luego es jalado de un baño de silicio fundido. Los átomos de silicio se unen al cristal de la semilla en la orientación deseada a medida que el cristal se retrae. También se utilizan técnicas de Czochralski de zona de flotación y líquido encapsulado. Se prefieren los monocristales, porque las propiedades eléctricas de monocristales uniformemente contaminados y, en esencia, sin dislocaciones, están mejor definidas que las del silicio policristalino.

A continuación de la producción de obleas de silicio, que por sí mismas requieren considerable gasto y experiencia, hay cuatro clases principales de procedimientos de fabricación de un circuito integrado. El primero, conocido como procesamiento de "etapa inicial", com-



b)

Figura 19-18 a) Técnica de crecimiento de Czochralski para el crecimiento de monocristales de silicio. (De Microchip Fabrication, 3a. ed., por P. VanZant, fig.3-7. Copyright © 1997 The McGraw-Hill Companies. Reimpreso con permiso de The McGraw-Hill Companies.) b) Pasos generales encontrados en el procesamiento de semiconductores. Producción de un dispositivo semiconductor FET: i) Se oxida un sustrato de silicio tipo p . ii) En un proceso conocido como fotolitografía, radiación ultravioleta pasa por una fotomascarilla (que es muy semejante a un estencil), con lo cual expone un material fotosensible conocido como sustancia fotoendurecible previamente sedimentada en la superficie. iii) Se disuelve la sustancia fotoendurecible expuesta. iv) La sílice expuesta se remueve por ataque químico. v) Se introduce un dopante tipo n para producir la fuente y el dren. vi) El silicio se oxida de nuevo. vii) Se repite la fotolitografía para introducir otros componentes, incluyendo conexiones eléctricas, para el dispositivo. (De Fundamentals of Modern Manufacturing, por M.P. Groover, p. 849, figs. 34-3. © John Wiley & Sons, Inc. Reproducida con permiso de John Wiley & Sons, Inc.)

prende los pasos en los cuales los componentes eléctricos (transistores, por ejemplo) son creados en las regiones más altas de la superficie de la oblea semiconductora. Es importante observar que casi todo el grueso de la oblea existe sólo como soporte mecánico; los componentes eléctricamente activos se forman en la superficie y por lo general se extienden sólo unas pocas milésimas de milímetro en la oblea. El procesamiento de etapa inicial puede incluir cien o más pasos. En la figura 19-18b) se ilustra un diagrama esquemático de algunos pasos ejemplares en el procesamiento de la etapa inicial para producir un transistor de efecto de campo.

El procesamiento de “etapa final” ocasiona la formación de una red de “interconexiones” en la superficie de la oblea y apenas arriba de ésta. Las interconexiones se forman en películas delgadas de material depositado sobre la oblea que son dibujadas con redes precisas; éstas sirven como rutas conductoras en tres dimensiones que permiten que las señales eléctricas pasen entre los componentes electrónicos individuales, como se requiere para que el CI opere y ejecute operaciones matemáticas y lógicas, o para que almacene y recupere datos. El proceso de etapa final culmina con capas protectoras de material aplicado a las obleas que impiden daños mecánicos y ambientales. Una característica de la fabricación de los CI es que con frecuencia se fabrican, al mismo tiempo, grandes números de obleas, con varios cientos o varios miles de CI, donde cada uno de ellos a su vez puede tener varios millones o varios miles de millones de componentes individuales.

Una vez terminado el proceso de etapa final, las obleas son sometidas a diversos procedimientos de prueba para evaluar tanto la oblea en su conjunto como los chips individuales. A medida que el número de componentes por chip ha aumentado y el tamaño de los componentes se ha reducido, los procedimientos de prueba se han hecho más complejos y especializados. Se desechan las obleas con una fracción demasiado pequeña de chips que funcionan en forma apropiada.

Los últimos pasos al producir CI funcionales se conocen de manera colectiva como “encapsulado”, durante los cuales las obleas se cortan para producir chips individuales, y que físicamente son distintos. Para proteger los chips contra daños, corrosión y cosas semejantes, así como para permitir que las señales eléctricas entren y salgan de los chips, son colocados en recipientes especiales herméticamente sellados que a veces son sólo apenas más grandes que el chip en sí. Una computadora equipada con un solo microprocesador contiene muchos otros chips para muchas otras funciones.

19-7 Deposición de películas delgadas

Como se vio en la sección 19-6, la fabricación de circuitos integrados depende en parte de la deposición de **películas delgadas** de materiales sobre un sustrato. Esto es igualmente cierto para numerosas tecnologías que emplean películas, recubrimientos y otras capas delgadas de materiales, por ejemplo capas resistentes al desgaste en herramientas de corte, recubrimientos antirreflejantes en componentes ópticos, así como capas magnéticas depositadas sobre discos de aluminio para almacenar datos. Las películas delgadas pueden presentar microestructuras y propiedades físicas muy diferentes que sus similares voluminosas, características que pueden ser explotadas de varias maneras. La creación, el estudio y el uso de películas delgadas representa un campo de actividad extraordinariamente amplio de la ciencia e ingeniería de materiales, que tiene un impacto enorme en la tecnología moderna.

Como su nombre lo implica, las películas delgadas son muy pequeñas en una dimensión, en especial en comparación con la magnitud de las otras dos dimensiones. No hay límite superior bien definido en lo que significa “delgadas”, pero numerosas tecnologías modernas en forma rutinaria utilizan grosores desde varios micrones hasta unas pocas dimensiones atómicas. Hay miles de formas en las que se pueden depositar películas delgadas, pero, en general, cualquier técnica abarca una *fuentes* del material a depositarse y un medio para *transportar* el material de la fuente a la superficie de la pieza de trabajo en la que haya que depositarse. Muchas técnicas de deposición requieren que la fuente y la pieza de trabajo se mantengan en un sistema de vacío, en tanto que otras ponen la pieza de trabajo en un ambiente líquido.

La **deposición física de vapor (DFV)** es una categoría muy importante de las técnicas de crecimiento de película delgada. La DFV tiene lugar en una cámara de vacío y por un medio u otro se crea un vapor de baja presión del material a depositar. Parte de este vapor se condensará en la pieza de trabajo y por tanto empieza a depositarse en una película delgada. Simplemente fundir un material en un vacío, dependiendo de su presión de vapor, puede a veces producir un depósito útil de material.

La **deposición electrónica** es un ejemplo de sedimentación física de vapor y es el método más importante de la DFV para la manufactura de circuitos integrados. Las interconexiones que llevan señales eléctricas de un dispositivo electrónico a otro, en un chip de CI, por lo general se han hecho de aleaciones de aluminio sedimentadas por deposición electrónica. Este método se puede emplear para depositar materiales conductores y aislantes.

Como se ilustra en la figura 19-19, en una cámara de deposición electrónica, primero se ionizan argón u otros átomos en un gas y luego son acelerados por un campo eléctrico hacia una fuente de material a depositarse, a veces llamado "blanco". Estos iones desprenden y expulsan átomos de la superficie del material de la fuente, algunos de los cuales cruzan un vacío hacia la pieza de trabajo; los que se condensan en su superficie, se dice que están depositados. Dependiendo de cuánto tiempo continúe el proceso, es posible depositar electrónicamente películas que miden muchos micrones de grueso.

La **deposición química de vapor (DQV)** representa otro conjunto de técnicas de amplio uso en la industria de los CI. En la DQV, la fuente del material a ser depositado existe en forma gaseosa. El gas fuente y otros gases se introducen en una cámara caliente al vacío, en donde experimentan una reacción química que crea el material deseado como producto. Este producto se condensa en la pieza de trabajo (como en el proceso de DFV) creando así, con el tiempo, una capa del material. En algunos procesos DQV, la reacción química puede tener lugar de preferencia en la pieza de trabajo misma. Películas delgadas de silicio policristalino, tungsteno y nitruro de titanio son depositados comúnmente por DQV como parte de la manufactura del CI. El crecimiento de un nanoalambre, que se estudia en el capítulo 11, a veces también continúa por medio de un proceso de SQV.

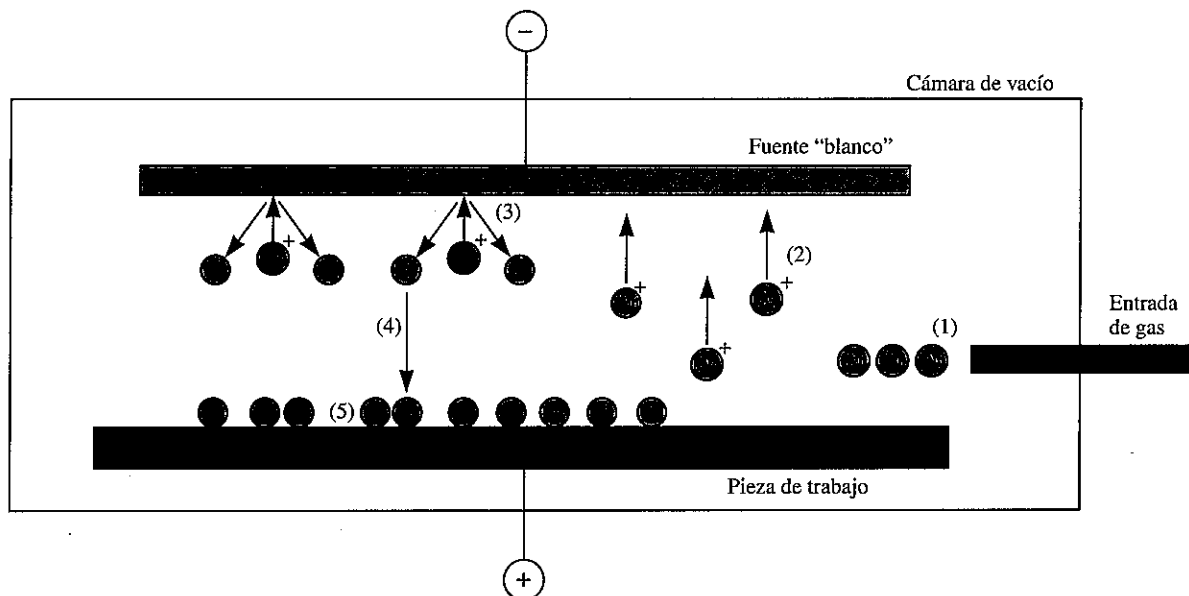


Figura 19-19 Ilustración esquemática de una deposición electrónica. La pieza de trabajo y el blanco de la deposición electrónica se colocan en una cámara de vacío. (1) Una entrada permite que un gas como el argón penetra a baja presión. En presencia del campo eléctrico entre el blanco y la pieza de trabajo, algunos de los átomos de argón son ionizados (2) y luego acelerados hacia el blanco. Por transferencia de cantidad de movimiento, átomos del blanco son expulsados (3), se mueven por la brecha hacia la pieza de trabajo (4) y se condensan en la pieza de trabajo (5), depositándose átomos del blanco y finalmente formando una película. (Cortesía de John Bravman.)

La **electrodeposición** es un tercer método de crear películas delgadas en una pieza de trabajo. Aun cuando ésta es una tecnología muy vieja, en tiempos recientes se ha adoptado para utilizarla en la manufactura de los CI, en especial para depositar las películas de cobre que están sustituyendo a las películas de aluminio en los circuitos integrados más avanzados. En la electrodeposición, la fuente y la pieza de trabajo se sumergen en un electrolito líquido y también se conectan por medio de un circuito eléctrico externo. Cuando se aplica un voltaje entre la fuente y la pieza de trabajo, iones del material de la fuente se disuelven en el electrolito, se mueven bajo la influencia del campo hacia la pieza de trabajo y químicamente se enlazan sobre su superficie. Con el tiempo, se deposita una película delgada en esa forma. En algunas circunstancias, puede no ser necesario un campo eléctrico externo, lo cual se denomina deposición sin electrodos. La electrodeposición y la deposición sin electrodos, a veces se conocen como "platinado" y la película sedimentada se dice que está "plateada" en la pieza de trabajo.

19-8 Conductividad en otros materiales

La conductividad eléctrica en casi todos los materiales cerámicos y polímeros es baja; no obstante, materiales especiales dan una conducción limitada y hasta buena. En el capítulo 4, se analizó la forma en que se puede usar la notación Kröger-Vink para explicar la química de defectos en materiales cerámicos. Con el uso de dopantes, es posible convertir en óxidos conductores a muchos materiales cerámicos (por ejemplo BaTiO_3 , TiO_2 , ZnO) que normalmente son aislantes. La conducción en estos materiales puede ocurrir como resultado del movimiento de iones o electrones y orificios.

Conducción en materiales iónicos La conducción en materiales iónicos a veces ocurre por movimiento de iones completos, porque la brecha de energía es demasiado grande para que entren electrones a la banda de conducción. Por tanto, casi todos los materiales iónicos se comportan como aislantes.

En materiales iónicos, la movilidad de los portadores de carga, o iones, es

$$\mu = \frac{ZqD}{k_B T} \quad (19-15)$$

donde D es el coeficiente de difusión, k_B es la constante de Boltzmann, T es la temperatura absoluta, q es la carga electrónica y Z es la carga en el ion. La movilidad es de muchos órdenes de magnitud menor que la movilidad de los electrones; por tanto, la conductividad es muy pequeña:

$$\sigma = nZq\mu \quad (19-16)$$

Para materiales iónicos, n es la concentración de iones que contribuyen a la conducción. Las impurezas y vacancias aumentan la conductividad. Las vacancias son necesarias para la difusión en tipos sustitucionales de estructuras cristalinas, y las impurezas pueden difundirse y ayudar a llevar la corriente. Las temperaturas elevadas aumentan la conductividad porque incrementa la rapidez de difusión. El siguiente ejemplo ilustra la estimación de la movilidad y la conductividad en el MgO .

Ejemplo 19-6 Conductividad iónica en MgO

Suponga que la conductividad eléctrica del MgO está determinada principalmente por la difusión de los iones Mg^{2+} . Estime la movilidad de los iones Mg^{2+} y calcule la conductividad eléctrica del MgO a 1800°C . El coeficiente de difusión de iones Mg^{2+} en MgO a 1800°C es $10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$.

SOLUCIÓN

Para MgO, $Z = 2/\text{ion}$, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ y $T = 2073 \text{ K}$:

$$\mu = \frac{ZqD}{k_B T} = \frac{(2)(1.6 \times 10^{-19})(10^{-10})}{(1.38 \times 10^{-23})(2073)} = 1.12 \times 10^{-9} \text{ C} \cdot \text{cm}^2/(\text{J} \cdot \text{s})$$

Como un coulomb es equivalente a un ampere · segundo, y un joule es equivalente a un ampere · segundo · volt:

$$\mu = 1.12 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$$

El MgO tiene la estructura del NaCl con cuatro iones de magnesio por celda unitaria. El parámetro de red es $3.96 \times 10^{-8} \text{ cm}$, de modo que el número de iones de Mg^{2+} por centímetro cúbico es

$$n = \frac{4 \text{ Mg}^{2+} \text{ iones/celda}}{(3.96 \times 10^{-8} \text{ cm})^3} = 6.4 \times 10^{22} \text{ iones/cm}^3$$

$$\begin{aligned} \sigma &= nZq\mu = (6.4 \times 10^{22})(2)(1.6 \times 10^{-9})(1.12 \times 10^{-9}) \\ &= 23 \times 10^{-6} \text{ C} \cdot \text{cm}^2/(\text{cm}^3 \cdot \text{V} \cdot \text{s}) \end{aligned}$$

Como un coulomb es equivalente a un ampere · segundo ($\text{A} \cdot \text{s}$) y un volt es equivalente a un ampere · ohm ($\text{A} \cdot \Omega$),

$$\sigma = 2.3 \times 10^{-5} \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$$

Aplicaciones de óxidos iónicamente conductores El óxido transparente y conductor de más uso es el óxido de estaño e indio (ITO), que se usa como recubrimiento conductor transparente en vidrio en placa. Otras aplicaciones del (ITO) incluyen pantallas táctiles para computadoras y dispositivos tales como máquinas de cajeros automáticos. Otros óxidos conductores son el zirconio estabilizado con itria (YSZ), que se usa como electrolito sólido en celdas de combustible de óxido sólido. El óxido de cobalto de litio se usa como electrolito sólido en baterías de iones de litio. Es importante recordar que, aun cuando casi todos los materiales cerámicos se comportan como aislantes eléctricos, por medio de un diseño apropiado de los defectos puntuales en materiales cerámicos es posible convertir muchos de ellos en semiconductores.

Conducción en polímeros Debido a que sus electrones de valencia intervienen en enlaces covalentes, los polímeros tienen una estructura de banda con una brecha de energía grande, lo cual lleva a una baja conductividad eléctrica. Los polímeros se usan con frecuencia en aplicaciones que requieren aislamiento eléctrico para evitar cortocircuitos, arqueo y riesgos de seguridad. La tabla 19-1 incluye la conductividad de cuatro polímeros comunes. En algunos casos, no obstante, la baja conductividad es un obstáculo. Por ejemplo, si un rayo incide sobre el ala del compuesto de matriz polimérica de un avión, pueden ocurrir graves daños. Se pueden resolver estos problemas mediante dos procedimientos: (1) introducir un aditivo al polímero para mejorar la conductividad, y (2) crear polímeros que inherentemente tienen buena conductividad.

La introducción de aditivos eléctricamente conductores puede mejorar la conductividad. Por ejemplo, los materiales compuestos de matriz polimérica que contienen fibras de carbono o de carbono chapado con níquel combinan elevada rigidez con mejor conductividad; los compuestos híbridos que contienen fibras de metal, junto con carbono normal, vidrio o fibras de aramida, también producen revestimientos contra rayos en aviones. La figura 19-20 muestra que cuando

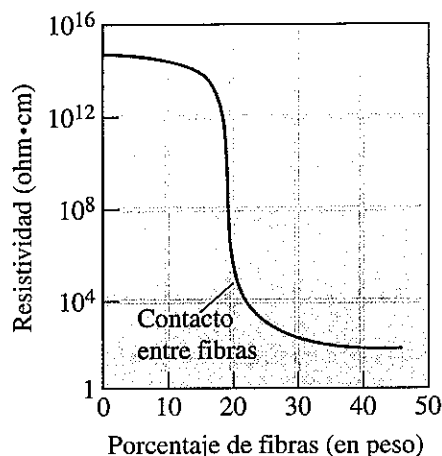


Figura 19-20
Efecto de fibras de carbono en la resistividad eléctrica del carbono.

suficientes fibras de carbono se introducen en nylon para asegurar que haya contacto entre fibras, la resistividad se reduce en casi 13 órdenes de magnitud. También se usan rellenos y fibras conductoras para producir polímeros que protegen contra la radiación electromagnética.

Algunos polímeros inherentemente tienen buena conductividad como resultado de técnicas de dopado o de procesamiento. Cuando los polímeros acetales son dopados con agentes como el pentafluoruro de arsénico, electrones u orificios pueden saltar libremente de un átomo a otro a lo largo de la estructura de la cadena, aumentando la conductividad a casi la de metales. Algunos polímeros, por ejemplo el polifitalocianino, pueden ser eslabonados en cruz por medio de procesos especiales de curado para elevar la conductividad hasta a $10^2 \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, proceso que permite que el polímero se comporte como un semiconductor. Debido al enlace cruzado, los electrones pueden moverse con más facilidad de una cadena a otra. Los diodos emisores de luz orgánicos se fabrican de polímeros semiconductores que incluyen polianilinas.

19-9 Aislantes y sus propiedades dieléctricas

Los materiales que se utilizan para aislar un campo eléctrico de su entorno se requieren en gran número de aplicaciones eléctricas y electrónicas. Los aislantes eléctricos obviamente deben tener muy baja conductividad, o alta resistividad, para evitar el flujo de corriente. Los aislantes también deben ser capaces de resistir intensos campos eléctricos. Los aislantes se producen de materiales cerámicos y poliméricos en los que hay una gran brecha de energía entre las bandas de valencia y de conducción; no obstante, la alta resistividad eléctrica de estos materiales no siempre es suficiente. A altos voltajes, puede ocurrir una catastrófica ruptura del aislante, y puede fluir la corriente. Por ejemplo, los electrones pueden tener energías cinéticas suficientes para ionizar los átomos del aislante, creando así electrones libres y generando una corriente a altos voltajes. Para seleccionar apropiadamente un material aislante, se debe comprender la forma en que el material almacena, y conduce, carga eléctrica. La porcelana, alúmina, cordierita, mica y algunos vidrios y plásticos se usan como aislantes. La resistividad de la mayor parte de éstos es $> 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$, y los campos eléctricos de ruptura son de ~ 5 a 15 kV/mm .

19-10 Polarización en dieléctricos

Cuando se aplica un esfuerzo a un material, se desarrolla un cierto nivel de deformación. Del mismo modo, cuando se someten materiales a un campo eléctrico, los átomos, moléculas o iones responden al campo eléctrico (E) aplicado. Así, se dice que el material está polarizado. Un dipolo es un par de cargas opuestas separadas por cierta distancia. Si una carga de $+q$ es separada de otra carga $-q$ (q es la carga electrónica) y d es la distancia entre estas cargas, el momento de dipolo es $q \times d$. La magnitud de polarización está dada por $P = zqd$, donde z es el número de centros de carga que son desplazados por metro cúbico.

Cualquier separación de cargas (por ejemplo, entre el núcleo y la nube de electrones) o cualquier mecanismo que lleve a un cambio en la separación de cargas que ya están presentes (por ejemplo, movimiento o vibraciones de iones en un material iónico) causan **polarización**. Hay cuatro mecanismos principales que causan polarización. (1) polarización electrónica, (2) polarización iónica, (3) polarización molecular y (4) carga espacial (figura 19-21). Su aparición depende de la frecuencia eléctrica del campo aplicado, igual que el comportamiento mecánico de los materiales depende de la rapidez de deformación (capítulos 6 y 8). Si se aplica una deformación muy rápida, ciertos mecanismos de deformación plástica no son activados. Del mismo modo, si se aplica un campo eléctrico que se alterna rápidamente, algunos mecanismos de polarización pueden no ser capaces de inducir polarización en el material.

Los mecanismos de polarización desempeñan dos papeles importantes. Primero, si se hace un **condensador** de un material, los mecanismos de polarización permiten almacenar carga, porque los dipolos creados en el material (como resultado de la polarización) pueden fijar cierta parte de la carga de los electrodos del condensador. En esa forma, cuanto más alta sea la polarización dieléctrica, mayor será la constante dieléctrica (k) del material. La constante dieléctrica se define como la relación de capacitancia entre un condensador lleno de material dieléctrico y uno con vacío entre sus electrodos. Este almacenamiento de carga, en algunas formas, es semejante a la deformación elástica en un material sujeto a un esfuerzo. El segundo papel importante que desempeñan los mecanismos de polarización es que, cuando se establece la polarización, se mueven cargas (los iones o nubes de electrones se desplazan). Si oscila el campo eléctrico, las cargas se mueven hacia adelante y hacia atrás. Estos desplazamientos son extraordinariamente pequeños (por lo general $< 1 \text{ \AA}$); no obstante, ocasionan **pérdidas dieléctricas**. Esta energía se pierde como calor. La pérdida dieléctrica es semejante a la deformación viscosa de un material. Si se desea almacenar una carga, como en un condensador, la pérdida dieléctrica no es buena; pero, si se desea usar microondas para calentar un alimento, las pérdidas dieléctricas que ocurren en el agua contenida en el alimento son grandes. Es frecuente que las pérdidas dieléctricas se midan mediante un parámetro conocido como $\tan \delta$. Cuando estamos interesados en materiales con pérdida extraordinariamente baja, como los que se usan en comunicaciones por microondas, nos referimos a un parámetro conocido como *factor de calidad* ($Q_d \sim 1/\tan \delta$) del dieléctrico. La constante dieléctrica y las pérdidas dieléctricas dependen en gran medida de la frecuencia eléctrica y de la temperatura.

La polarización electrónica es omnipresente dado que todos los materiales contienen átomos. La nube de electrones es desplazada del núcleo en respuesta al campo visto por los átomos. La separación de cargas crea un momento dipolar [figura 19-21a)]. Este mecanismo puede resistir las más altas frecuencias eléctricas ($\sim 10^{15} \text{ Hz}$) porque una nube de electrones está más alejada del núcleo y mantenida fuertemente. Este mecanismo de polarización también está unido en forma estrecha al índice de refracción de los materiales, dado que la luz es una onda electromagnética para la cual el campo eléctrico oscila a muy altas frecuencias ($\sim 10^{14} - 10^{16} \text{ Hz}$). Cuanto más elevada sea la polarización electrónica, mayor será el índice de refracción. Se usa este mecanismo en la fabricación de "cristal de plomo", que en realidad es un vidrio amorfo que contiene hasta 30% de PbO . Los iones grandes de plomo (Pb^{2+}) son

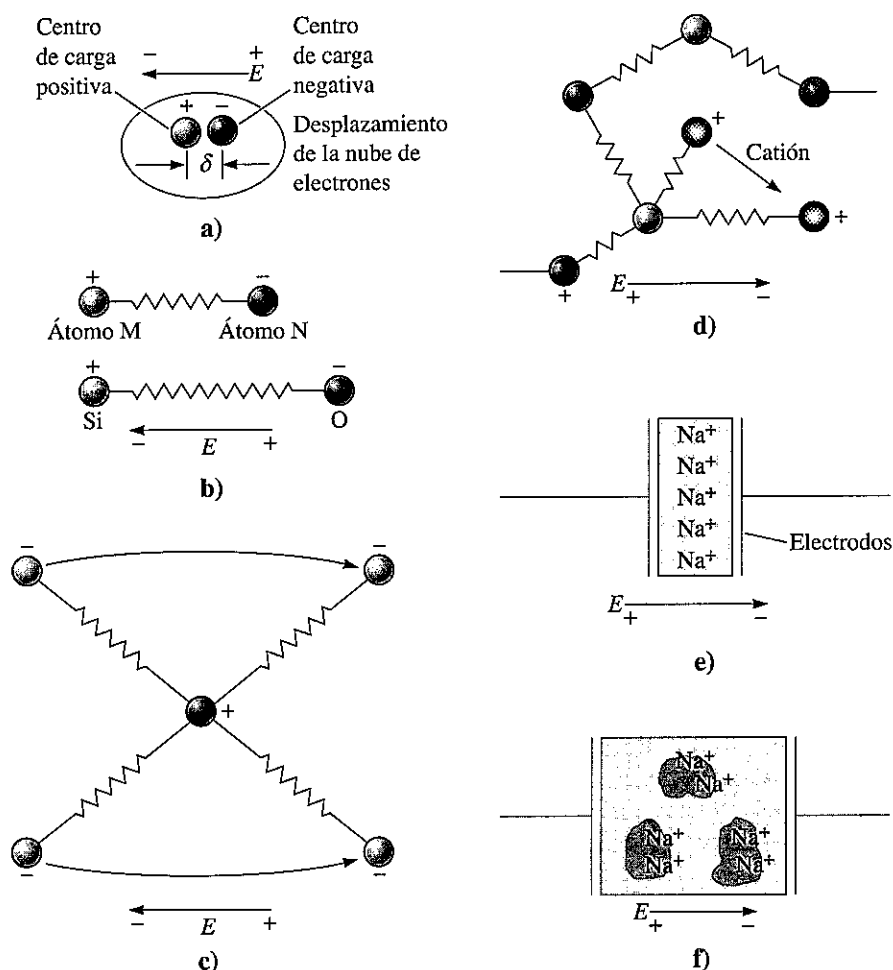


Figura 19-21 Mecanismos de polarización en materiales: a) electrónica, b) atómica o iónica, c) dipolar de alta frecuencia o de orientación (presente en materiales ferroeléctricos), d) dipolar de baja frecuencia (presente en dieléctricos lineales y vidrios), e) carga espacial interfacial en electrodos y f) carga espacial interfacial en heterogeneidades, como límites de grano, por ejemplo. (De *Principles of Electronic Ceramics*, L.L. Hench y J.K. West, p. 188, fig. 5-2. Copyright © 1990 Wiley Interscience. Reimpresa con permiso. Este material se utiliza con permiso de John Wiley & Sons, Inc.)

altamente polarizables debido a los mecanismos de polarización electrónica, y son un índice de alta refracción cuando concentraciones suficientemente altas de óxido de plomo están presentes en el vidrio.

Ejemplo 19-7 Polarización electrónica en cobre

Suponga que el desplazamiento promedio de los electrones con respecto al núcleo en un átomo de cobre es 10^{-8} Å cuando se aplica un campo eléctrico en una placa de cobre. Calcule la polarización electrónica.

SOLUCIÓN

El número atómico del cobre es 29, de modo que hay 29 electrones en cada átomo de cobre. El parámetro de red del cobre es $3.6151 \text{ \AA}$. Entonces,

$$z = \frac{(4 \text{ átomos/celda})(29 \text{ electrones/átomo})}{(3.6151 \times 10^{-10} \text{ m})^3} = 2.455 \times 10^{30} \text{ electrones/m}^3$$

$$P = zqd = \left(2.455 \times 10^{30} \frac{\text{electrones}}{\text{m}^3} \right) \left(1.6 \times 10^{-19} \frac{\text{C}}{\text{electrón}} \right) (10^{-8} \text{ L})(10^{-10} \text{ m/\AA})$$

$$= 3.93 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$$

Dependencia de la frecuencia y la temperatura de la constante dieléctrica y las pérdidas dieléctricas

Un condensador es un dispositivo capaz de almacenar una carga eléctrica. Por lo general está formado por dos electrodos con un material dieléctrico colocado entre ellos. El dieléctrico puede o no ser sólido; incluso un vacío de aire puede servir como dieléctrico. Dos electrodos paralelos de placas planas representan la configuración más sencilla de un condensador.

La capacitancia C es la capacidad de almacenar carga y se define como

$$C = \frac{Q}{V} \quad (19-17)$$

donde Q es la carga en las placas de los electrodos de un condensador y V es el voltaje aplicado [figura 19-22a)]. Nótese que debe aplicarse un voltaje para crear la carga en los electrodos, pero que la carga está “almacenada” en ausencia del voltaje hasta que un circuito externo permita disiparla. En dispositivos microelectrónicos, ésta es la base para almacenar datos

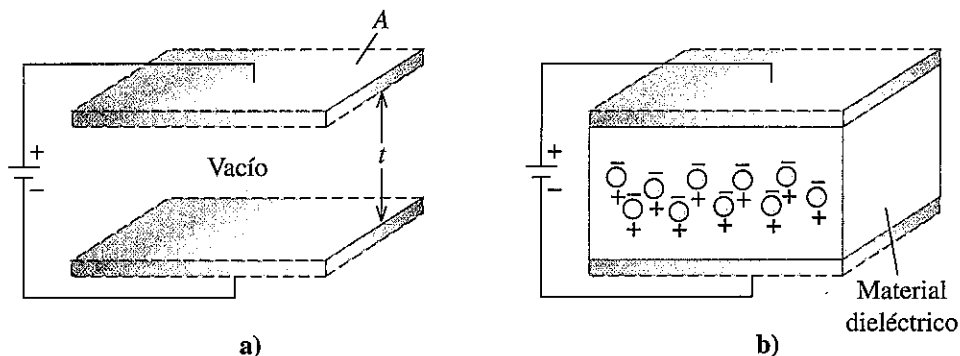


Figura 19-22 a) Puede almacenarse una carga en las placas conductoras en un vacío. b) Cuando un dieléctrico se coloca entre las placas, el dieléctrico se polariza y se almacena una carga adicional.

digitales. Si el espacio entre dos placas paralelas (con área superficial A y separadas por una distancia t) se llena con un material, entonces la constante dieléctrica k , también conocida como permisividad relativa ϵ_r , se determina de acuerdo con

$$C = \frac{k \epsilon_0 A}{t} \quad (19-18)$$

La constante ϵ_0 es la **permisividad** de un vacío y es 8.85×10^{-12} F/m. Cuando el material experimenta polarización, puede fijar cierta cantidad de carga en los electrodos, como se ilustra en la figura 19-22b). Cuanto mayor sea la polarización, más alta es la constante dieléctrica y, por tanto, mayor es la carga fija en los electrodos.

La constante dieléctrica es la medida de qué tan susceptible es el material respecto al campo eléctrico aplicado. La constante dieléctrica depende de la composición, la microestructura, la frecuencia eléctrica y la temperatura. La capacitancia depende de la constante dieléctrica, del área de los electrodos, y de la separación entre los electrodos. Los condensadores en paralelo dan capacitancia sumada (igual que las resistencias se suman en serie). Ésta es la razón por la cual los condensadores de capas múltiples están formados por 100 o más capas conectadas en paralelo. Por lo general, éstas se basan en fórmulas de BaTiO_3 y se preparan usando un proceso de vaciado en cinta. Se usa paladio de plata o níquel como capas de electrodos.

Para un aislamiento eléctrico, la **resistencia dieléctrica** (es decir, el valor del campo eléctrico que puede ser soportado antes de la ruptura eléctrica) es importante. Las propiedades dieléctricas de algunos materiales se muestran en la tabla 19-7.

Dieléctricos lineales y no lineales La constante dieléctrica, como es de esperarse, está relacionada con la polarización que puede obtenerse en el material. Es posible demostrar que la polarización dieléctrica inducida en un material depende del campo eléctrico aplicado, y de la constante dieléctrica, de acuerdo con

$$P = (k - 1)\epsilon_0 E \text{ (para dieléctricos lineales)} \quad (19-19)$$

TABLA 19-7 $\square$ Propiedades de materiales dieléctricos seleccionados

Material	Constante dieléctrica		Resistencia dieléctrica (10^6 V/m)	$\tan \delta$ (a 10^6 Hz)	Resistividad (ohm $\cdot$ cm)
	(a 60 Hz)	(a 10^6 Hz)			
Poliétileno	2.3	2.3	20	0.00010	$> 10^{16}$
Teflón	2.1	2.1	20	0.00007	10^{18}
Poliestireno	2.5	2.5	20	0.00020	10^{18}
PVC	3.5	3.2	40	0.05000	10^{12}
Nylon	4.0	3.6	20	0.04000	10^{15}
Caucho	4.0	3.2	24		
Fenólico	7.0	4.9	12	0.05000	10^{12}
Epoxi	4.0	3.6	18		10^{15}
Cera de parafina		2.3	10		10^{13} - 10^{19}
Sílice fundida	3.8	3.8	10	0.00004	10^{11} - 10^{12}
Vidrio de sosa-cal	7.0	7.0	10	0.00900	10^{15}
Al_2O_3	9.0	6.5	6	0.00100	10^{11} - 10^{13}
TiO_2		14-110	8	0.00020	10^{13} - 10^{18}
Mica		7.0	40		10^{13}
BaTiO_3		2000-5000	12	~ 0.0001	10^8 - 10^{15}
Agua		78.3			10^{14}

donde E es la resistencia del campo eléctrico (V/m). Para materiales que se polarizan con facilidad, la constante dieléctrica y la capacitancia son grandes y, a su vez, una gran cantidad de carga se puede almacenar. Además, la ecuación 19-19 sugiere que la polarización aumenta, al menos hasta que todos los dipolos estén alineados, cuando se incrementa el voltaje (expresado por la resistencia del campo eléctrico). La cantidad $(k-1)$ se conoce como susceptibilidad dieléctrica (χ_e). La constante dieléctrica del vacío es uno, o la susceptibilidad dieléctrica es cero. Esto tiene sentido porque un vacío no contiene átomos ni moléculas.

En **dieléctricos lineales**, P está linealmente relacionada con E y k es constante. Esto es semejante a la forma en que un esfuerzo y una deformación están linealmente relacionados por la ley de Hooke. En dieléctricos lineales, k (o χ_e) permanece constante cuando cambia E . En materiales como el BaTiO_3 , la constante dieléctrica cambia con E , y en consecuencia no se puede usar la ecuación 19-19. Estos materiales en los que P y E no están relacionadas por una recta se conocen como **dieléctricos no lineales** o **ferroeléctricos**. Estos materiales son semejantes a elastómeros para los cuales un esfuerzo y una deformación no están relacionados linealmente y no se puede asignar un valor único al módulo de Young.

19-11 Electrostricción, piezoelectricidad y ferroelectricidad

Cuando cualquier material experimenta polarización se desplazan sus iones y nubes de electrones, ocasionando el desarrollo de una deformación mecánica en el material. Este efecto se ve en todos los materiales sujetos a un campo eléctrico y se conoce como **electrostricción**.

Del total de 32 clases de cristales, 11 tienen un centro de simetría. Esto significa que si se aplica un esfuerzo mecánico, no se genera momento dipolar porque los movimientos iónicos son simétricos. De los 21 que restan, 20 grupos puntuales, que carecen de centro de simetría, exhiben el desarrollo de polarización dieléctrica cuando se someten a un esfuerzo. Estos materiales se conocen como **piezoeléctricos**. (La palabra *piezo* significa presión.) Cuando estos materiales se someten a un esfuerzo, desarrollan un voltaje. Este desarrollo del voltaje a la aplicación de un esfuerzo se conoce como *efecto piezoeléctrico motor o directo* (figura 19-23). Este efecto ayuda a hacer dispositivos como encendedores de chispa, que a veces se hacen usando titanato de zirconio en plomo (PZT). Este efecto también se usa, por ejemplo, para detectar submarinos y otros objetos bajo la superficie del agua.

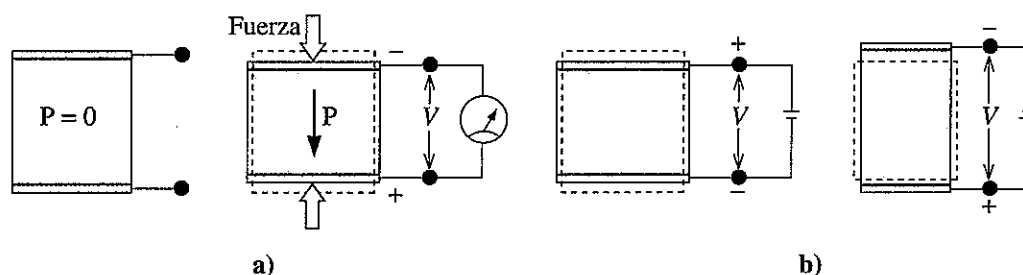


Figura 19-23 Efecto piezoeléctrico a) directo y b) inverso. En el efecto piezoeléctrico directo, el esfuerzo aplicado hace que aparezca un voltaje. En el efecto inverso b), un voltaje aplicado lleva al desarrollo de una deformación.

Por el contrario, Cuando se aplica un voltaje eléctrico, un material piezoeléctrico muestra el desarrollo de una deformación. Esto se conoce como *efecto piezoeléctrico generador o inverso*. Este efecto se usa para la fabricación de activadores. Por ejemplo, este movimiento puede usarse para generar ondas de ultrasonido que se emplean para tomar imágenes médicas, así como en aplicaciones como limpiadores ultrasónicos o cepillos dentales. También se puede crear energía sónica usando piezoeléctricos para fabricar el altavoz de “agudos” de alta fidelidad que se encuentra en casi todos los sistemas de sonido. Además del $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ (PZT), otros piezoeléctricos incluyen SiO_2 (para fabricar osciladores de cristal de cuarzo), ZnO y fluoruro de polivinilideno (PVDF). Numerosos materiales que se presentan en la naturaleza, como el hueso y la seda, también son piezoeléctricos.

La constante “ d ” para un piezoeléctrico se define como la razón entre la deformación (ϵ) y el campo eléctrico:

$$\epsilon = d \cdot E \quad (19-20)$$

La constante “ g ” para un piezoeléctrico se define como la razón entre el campo eléctrico generado y el esfuerzo aplicado (X):

$$E = g \cdot X \quad (19-21)$$

Los coeficientes piezoeléctricos d y g están relacionados por la constante dieléctrica como:

$$g = \frac{d}{k\epsilon_0} \quad (19-22)$$

Se definen como **ferroeléctricos** a los materiales que muestran el desarrollo de una polarización dieléctrica (P_s) espontánea y reversible. Ejemplos incluyen el polimorfo tetragonal de titanato de bario. El titanato de zirconio de plomo es ferroeléctrico y piezoeléctrico. Los materiales ferroeléctricos muestran un **ciclo de histéresis** (es decir, la polarización inducida no está linealmente relacionada con el campo eléctrico aplicado) como se ve en la figura 19-24.

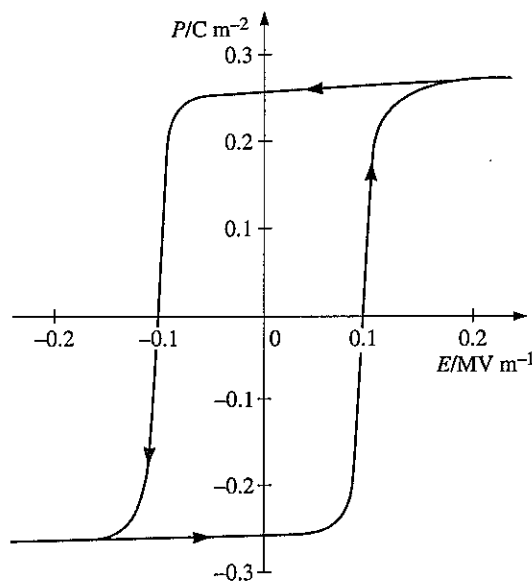


Figura 19-24

Ciclo de histéresis ferroeléctrico para un cristal de dominio individual de BaTiO_3 . (De *Electroceramics: Material, Properties, Applications*, por A.J. Moulson y J.M. Herbert, p. 76, fig. 2-46. Copyright © 1990 Chapman and Hall. Reimpresa con el amable permiso de Kluwer Academic Publishers y el autor.)

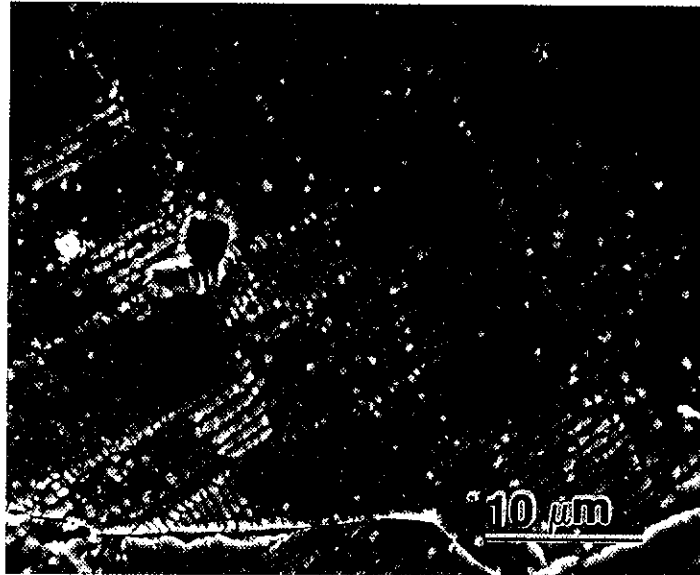


Figura 19-25
Pueden verse dominios ferroeléctricos en la microestructura del BaTiO_3 policristalino. (Cortesía del Dr. Rodney Roseman, Universidad de Cincinnati.)

Los materiales ferroeléctricos exhiben dominios ferroeléctricos en los que la región (o dominio) tiene una polarización uniforme (figura 19-25.) Ciertos ferroeléctricos, por ejemplo el PZT, exhiben un fuerte efecto piezoelectrico, pero para maximizar éste (por ejemplo el desarrollo de una deformación o un voltaje), en los materiales piezoelectricos se inducen polos en forma deliberada usando un campo eléctrico para alinear todos los dominios en una dirección. El campo eléctrico se aplica a alta temperatura y se mantiene mientras el material se enfría.

La constante dieléctrica de los materiales ferroeléctricos alcanza un máximo cerca de una temperatura conocida como **temperatura de Curie**. A esta temperatura, la estructura cristalina adquiere un centro de simetría y entonces ya no es piezoelectrica. Incluso a estas altas temperaturas, sin embargo, la constante dieléctrica de los materiales ferroeléctricos permanece alta. El BaTiO_3 exhibe este comportamiento y ésta es la razón por la cual el BaTiO_3 se usa para fabricar condensadores de una capa o de múltiples capas. En este estado, las vibraciones y los golpes no generan voltajes espurios debido al efecto piezoelectrico. Como la transición de Curie ocurre a una temperatura elevada, el uso de aditivos en el BaTiO_3 ayuda al desplazamiento de la temperatura de transición de Curie a temperaturas más bajas. También se pueden usar aditivos para ampliar la transición de Curie. Materiales como el $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ o PMN se conocen como *ferroeléctricos relajantes*. Estos materiales muestran constantes dieléctricas muy elevadas (hasta de 20 000) y buen comportamiento piezoelectrico, de modo que se usan para fabricar condensadores y dispositivos piezoelectricos.

Ejemplo 19-8

Diseño de un condensador de multicapa

Se va a diseñar un condensador de multicapas usando una fórmula de BaTiO_3 que contiene SrTiO_3 . La constante dieléctrica del material es de 3000. a) Calcule la capacitancia de un condensador de multicapas formado por 100 capas conectadas en paralelo que usa electrodos de níquel. El área de cada capa es de $10 \times 5 \text{ mm}$, y el grueso de cada capa es de $10 \mu\text{m}$.

SOLUCIÓN

a) La capacitancia de un condensador de placas paralelas está dada por

$$C = \frac{k\epsilon_0 A}{t}$$

Por tanto, la capacitancia por capa será

$$C_{\text{capa}} = \frac{(3000)(8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m})(10 \times 10^{-3} \text{ m})(5 \times 10^{-3} \text{ m})}{10 \times 10^{-6} \text{ m}}$$

$$C_{\text{capa}} = 13.28 \times 10^{-8}$$

Se tienen 100 capas conectadas en paralelo. Las capacitancias se suman en esta configuración. Todas las capas tienen las mismas dimensiones geométricas en este caso.

$$C_{\text{total}} = (\text{número de capas}) \cdot (\text{capacitancia por capa})$$

$$C_{\text{total}} = (100)(13.28 \times 10^{-8} \text{ F}) = 13.28 \mu\text{F}$$

Resumen

- Los materiales electrónicos incluyen aislantes, dieléctricos, conductores, semiconductores y superconductores. Estos materiales se pueden clasificar de acuerdo con las estructuras de sus bandas. Los materiales electrónicos han hecho posible numerosas tecnologías que van desde aislantes para líneas de alta tensión hasta celdas solares, chips para computadoras y muchos sensores y activadores.
- Entre las importantes propiedades de los conductores está la conductividad y la dependencia de la conductividad respecto a la temperatura. En metales puros, la resistividad aumenta con la temperatura. La resistividad es sensible a impurezas y a defectos tales como límites de grano. La resistividad a aleaciones es por lo general más elevada que la de metales puros.
- Los semiconductores tienen conductividades entre las de los aislantes y conductores y son mucho más malos conductores que los metales. Las conductividades de los semiconductores pueden ser alteradas en órdenes de magnitud por cantidades muy pequeñas de ciertos dopantes. Los semiconductores pueden clasificarse en elementales (Si, Ge) o compuestos (SiC, GaAs). Estos dos pueden ser intrínsecos o extrínsecos (tipo *n* o tipo *p*). Algunos semiconductores tienen brechas de bandas directas (por ejemplo el GaAs), mientras que otros tienen brechas de bandas indirectas (por ejemplo el Si).
- La creación de una región tipo *n* en un semiconductor tipo *p* (o viceversa) forma una unión *p-n*. La unión *p-n* se usa para fabricar diodos y transistores.
- La fabricación de microelectrónicos comprende cientos de procesos de precisión que pueden producir cientos de millones y hasta mil millones de transistores en un solo microchip.
- Las películas delgadas son componentes integrales de dispositivos de microelectrónica y también se usan para recubrimientos resistentes al desgaste y antirreflejantes. Se pueden depositar películas delgadas usando una amplia variedad de técnicas, incluyendo la deposición física de vapor, la deposición química de vapor y la electrodeposición.

- Los materiales iónicos conducen electricidad por medio del movimiento de iones o electrones y orificios.
- Los dieléctricos tienen brechas de banda grandes y no conducen electricidad. En los aislantes, el interés principal está en el voltaje de ruptura o campo. En el caso de los dieléctricos, el énfasis está en dependencia en la constante dieléctrica, la frecuencia y la temperatura. Los mecanismos de polarización en materiales dictan esta dependencia.
- En piezoeléctricos, la aplicación de esfuerzo da por resultado la aparición de un voltaje; la aplicación de un voltaje causa deformación.
- Los ferroeléctricos son materiales que muestran una polarización reversible y espontánea. El BaTiO₃, el PZT y el PVDF son ejemplos de ferroeléctricos. Los ferroeléctricos exhiben una constante dieléctrica grande y con frecuencia se usan para fabricar condensadores.

Glosario

Banda de conducción Niveles de energía no ocupados, hacia los que son excitados los electrones para obtener conductividad.

Banda de valencia Niveles de energía llenados por electrones en sus estados más bajos de energía.

Brecha de banda [E_g] Energía entre la parte superior de la banda de valencia y la inferior de la banda de conducción.

Brecha de energía [E_g] [Brecha de banda] Es la energía entre la parte superior de la banda de valencia y la inferior de la banda de conducción.

Campo eléctrico Gradiente de voltaje o volts por unidad de longitud.

Ciclo de histéresis Ciclo recorrido por la polarización no lineal en un material ferroeléctrico cuando se alterna un campo eléctrico. Un ciclo similar ocurre en ciertos materiales magnéticos.

Circuito integrado Paquete electrónico que contiene gran número de dispositivos electrónicos fabricados en un solo chip.

Condensador Dispositivo capaz de almacenar carga eléctrica. Por lo general consta de dos electrodos con un material dieléctrico colocado entre ellos, pero incluso un vacío de aire puede servir como dieléctrico. Un condensador puede tener una sola capa o multicapas.

Constante dieléctrica [k] Relación entre la permisividad de un material y la permisividad del vacío, la cual describe la capacidad relativa de dicho material a polarizarse y almacenar una carga; es igual que la permisividad relativa.

Dopado Adición deliberada de cantidades controladas de otros elementos para incrementar el número de portadores de carga en un semiconductor.

Densidad de corriente Corriente que fluye por unidad de área de sección transversal.

Deposición electrónica Proceso de crecimiento de película delgada por medio del que átomos de un gas son ionizados y luego acelerados por un campo eléctrico hacia la fuente, o "blanco", de material a ser depositado. Estos iones expulsan átomos de la superficie del blanco, algunos de los cuales son entonces depositados en un sustrato. La deposición electrónica es un tipo de proceso de deposición física de vapor.

Deposición física de vapor [DFV] Proceso de crecimiento de película delgada en el que vapor a baja presión suministra el material a ser depositado en un sustrato. La deposición electrónica es un ejemplo de SFV.

Deposición química de vapor [DCV] Proceso de crecimiento de película delgada en el que unos gases experimentan una reacción en una cámara de vacío caliente, para crear el producto deseado en un sustrato.

Dieléctricos lineales Materiales en los que la polarización directa está linealmente relacionada con el campo eléctrico; la constante dieléctrica no es dependiente del campo eléctrico.

Dieléctricos no lineales Materiales en los que la polarización dieléctrica no está linealmente relacionada con el campo eléctrico (por ejemplo, ferroeléctricos). Éstos tienen una constante dieléctrica dependiente del campo.

Electrodeposición Método para depositar materiales en los que una fuente y una pieza de trabajo se conectan eléctricamente y se sumergen en un electrolito. Se aplica un voltaje entre la fuente y la pieza de trabajo y iones de la fuente se disuelven en el electrolito, se mueven hacia la pieza de trabajo y gradualmente depositan una película delgada en su superficie.

Electroestricción Cambio en dimensiones que ocurre en cualquier material cuando un campo eléctrico actúa sobre él.

Energía de Fermi Nivel de energía al que la probabilidad de hallar un electrón es de $1/2$.

Estructura de banda La estructura de banda está formada por la distribución de niveles de energía, disponibles o prohibidos para ser ocupados por los electrones, y determina el comportamiento electrónico de un sólido que puede ser conductor, semiconductor o aislante.

Ferroeléctrico Material que presenta polarización dieléctrica espontánea y reversible.

Movilidad Facilidad con que se mueve un portador de carga en un material.

Orificios Niveles de energía no ocupados en la banda de valencia. Debido a que los electrones se mueven para ocupar orificios, éstos producen una corriente.

Película delgada Recubrimiento o capa que es pequeña o delgada en una dimensión. Grosos comunes van de $10 \text{ \AA}$ a unos cuantos micrones, dependiendo de la aplicación.

Pérdida dieléctrica Medida de la energía eléctrica perdida debido al movimiento de cargas que responden al campo eléctrico por medio de diferentes mecanismos de polarización. Esta energía aparece como calor.

Permisividad Es la capacidad de un material para polarizarse y almacenar una carga dentro de sí.

Piezoeléctricos Materiales que desarrollan un voltaje con la aplicación de un esfuerzo y desarrollan deformaciones cuando se les aplica un campo eléctrico.

Polarización Movimiento de entidades cargadas (es decir, nube de electrones, iones, dipolos y moléculas) en respuesta a un campo eléctrico.

Polarización directa Conexión de un dispositivo de unión p - n de tal manera que el lado p quede conectado al positivo, lo que permite el flujo de corriente.

Polarización inversa Conexión de un dispositivo de unión de manera que el lado p quede conectado a un terminal negativo; muy poca corriente pasa por una unión p - n bajo polarización inversa.

Propiedad sensible a microestructura Propiedades que dependen de la microestructura de un material (por ejemplo, conductividad, constante dieléctrica o resistencia a la fluencia).

Recombinación no radiante Generación de calor cuando un electrón pierde energía y cae de la banda de conducción a la banda de valencia para ocupar un orificio; esto ocurre principalmente en materiales de brecha de banda indirecta, como el silicio.

Recombinación radiante Es la emisión de luz cuando un electrón pierde energía y cae de la banda de conducción a la banda de valencia para ocupar un orificio; esto ocurre en materiales de brecha de banda directa como es el GaAs.

Rectificador Dispositivo de unión p - n que permite que fluya corriente en sólo una dirección en un circuito.

Regla de Matthiessen La resistividad de un material metálico está dada por la adición de una resistividad base que responde al efecto de temperatura (ρ_T), y un término independiente de temperatura, que refleja el efecto de los defectos de nivel atómico, incluyendo solutos que forman soluciones sólidas (ρ_d).

Resistencia dieléctrica Máximo campo eléctrico que puede mantenerse entre dos placas conductoras sin causar una ruptura.

Semiconductor extrínseco Semiconductor preparado por medio de la adición de contaminantes (dopantes), que determina el número y tipo de portadores de carga. El comportamiento extrínseco también puede verse debido a impurezas.

Semiconductor intrínseco Semiconductor cuyas propiedades están controladas por el elemento o compuesto que es el semiconductor y no por contaminantes o impurezas.

Superconductor Material que exhibe cero resistencia eléctrica bajo ciertas condiciones.

Temperatura de Curie Temperatura arriba de la cual un ferroeléctrico ya no es piezoeléctrico.

Termistor Dispositivo semiconductor que es particularmente sensible a cambios en temperatura, que le permiten servir como medida precisa de temperatura.

Transistor Dispositivo semiconductor que amplifica o conmuta señales eléctricas.

Trayectoria libre media [λ_e] Distancia promedio que los electrones se mueven sin ser dispersados por otros átomos o defectos de red.

Unión $p-n$ Dispositivo hecho para crear una región tipo n en un material tipo p (o viceversa). Una unión $p-n$ se comporta como diodo y las funciones $p-n$ múltiples funcionan como transistores. También es la base de los LED y de celdas solares.

Velocidad de deriva Rapidez promedio a la que se mueven electrones u otros portadores de carga por un material, bajo la influencia de un campo eléctrico o magnético.

Problemas

Sección 19-1 Ley de Ohm y conductividad eléctrica

Sección 19-2 Estructura de las bandas de sólidos

Sección 19-3 Conductividad de metales y aleaciones

- 19-1** Se hace pasar una corriente de 10 A por un alambre de 1 mm de diámetro y longitud de 1000 metros. Calcule la pérdida de energía si el alambre está hecho de
- aluminio y
 - silicio (véase la tabla 19-1).
- 19-2** Una fibra de nitruro de boro, de 0.5 mm de diámetro y 1 cm de largo, se coloca en un circuito de 120 V. Utilizando la tabla 19-1, calcule
- la corriente que fluye en el circuito y
 - el número de electrones que pasan por la fibra de nitruro de boro en un segundo.
 - ¿Cuál sería la corriente y el número de electrones si la fibra estuviera hecha de magnesio en lugar de nitruro de boro?
- 19-3** La potencia perdida en un alambre de cobre de 2 mm de diámetro debe ser menor a 250 W cuando una corriente de 5 A está circulando en el circuito. ¿Cuál es la longitud máxima del alambre?
- 19-4** Se aplica una densidad de corriente de 100 000 A/cm² a un alambre de oro de 50 m de largo. Se encuentra que la resistencia del alambre es de 2 ohms. Calcule el diámetro del alambre y el voltaje aplicado al alambre.

- 19-5** Se desea producir un resistor de 5 000 ohms hecho de fibra de boro-carburo y de un diámetro de 0.1 mm. ¿Cuál es la longitud requerida de la fibra?

- 19-6** La plata (Ag) tiene una conductividad eléctrica de $6.80 \times 10^5 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. El oro (Au) tiene una conductividad eléctrica de $4.26 \times 10^5 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. Calcule el número de portadores de carga por unidad de volumen y la movilidad de los electrones en cada uno de ellos, para considerar esta diferencia en la conductividad eléctrica. Comente sobre sus hallazgos.

- 19-7** Se aplica una densidad de corriente de 5 000 A/cm² a un alambre de magnesio. Si la mitad de los electrones de valencia actúan como portadores de carga, calcule la velocidad de deriva promedio de los electrones.

- 19-8** Se aplica un voltaje de 10 V a un alambre de aluminio de 2 mm de diámetro y 20 m de largo. Si el 10% de los electrones de valencia transportan la carga eléctrica, calcule la velocidad de deriva promedio tanto en km/h como en millas por hora.

- 19-9** En un proceso de soldadura, circula una corriente de 400 A por el arco cuando existe un voltaje de 35 V. La longitud del arco es de aproximadamente 0.1 pulg y el diámetro promedio es cercano a 0.18 pulg. Calcule la densidad de corriente en el arco, el campo eléctrico a través del mismo y la conductividad eléctrica de los gases calientes en el arco durante la operación de soldadura.

- 19-10** Trace un diagrama esquemático de las estructuras de las bandas de un aislante, un semiconductor y un material metálico. Utilice esto para explicar por qué la conductividad de los metales puros disminuye con una temperatura creciente, en tanto que ocurre lo contrario para semiconductores y aisladores.
- 19-11** El grosor típico de un conductor de cobre (conocido como interconector) en un circuito integrado es de 250 nm. La trayectoria libre media de los electrones en el cobre puro, recocido, es de alrededor de 40 nm. Cuando el grosor de los interconectores de cobre se aproxima a la trayectoria libre media, ¿cómo se espera que resulte afectada la conducción en el interconector? Explique.
- 19-12** Calcule la conductividad eléctrica del platino a $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 19-13** Calcule la conductividad eléctrica del níquel a $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y a $+500\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 19-14** Se encuentra que la resistividad eléctrica del cromo puro es de $18 \times 10^{-6}\text{ ohm} \cdot \text{cm}$. Estime la temperatura a la que se hizo la medición de la resistividad.
- 19-15** Después de hallar la conductividad eléctrica del cobalto a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, se decidió que se desearía duplicar la conductividad. ¿A qué temperatura se debe enfriar el metal?
- 19-16** De la figura 19-9b), estime el coeficiente de resistividad por defectos para el estaño en cobre.

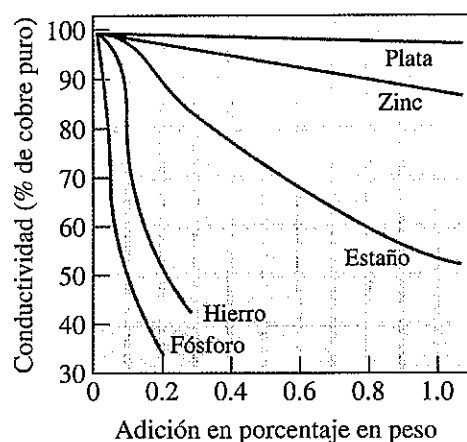


Figura 19-9 (Repetida para el problema 19-16.) Efecto de elementos seleccionados en la conductividad eléctrica del cobre.

- 19-17** a) El cobre y el níquel forman una solución sólida completa. Trace un diagrama esquemático que ilustre la resistividad de una aleación de cobre y níquel como función del porcentaje atómico del níquel. Comente por qué la curva tiene la forma que tiene.
- b) El cobre y el oro no forman una solución sólida completa. En las composiciones de 25 y 50 de porcentaje atómico de oro, se forman fases ordenadas de Cu_3Au y CuAu , respectivamente. ¿Usted espera que una gráfica de la resistividad de una aleación de cobre y oro como función del porcentaje atómico del oro tendrá una forma similar al trazo del inciso a)? Explique.
- 19-18** La resistividad eléctrica de una aleación de berilio que contiene 5% de átomos de un elemento de aleación es de $50 \times 10^{-6}\text{ ohm} \cdot \text{cm}$ a $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Determine las contribuciones a la resistividad debidas a la temperatura y a las impurezas, encontrando la resistividad esperada en el berilio puro a $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, la resistividad correspondiente a las impurezas y el coeficiente de resistividad por defectos. ¿Cuál sería la resistividad eléctrica a $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ si el berilio tuviera 10% atómico del elemento de aleación?

Sección 19-4 Semiconductores

Sección 19-5 Aplicaciones de los semiconductores

Sección 19-6 Repaso general del procesamiento de un circuito integrado

Sección 19-7 Deposición de películas delgadas

- 19-19** Explique los términos siguientes: semiconductor, semiconductor intrínseco, semiconductor extrínseco, semiconductor elemental, semiconductor compuesto, semiconductor de brecha de banda directa y semiconductor de brecha de banda indirecta.
- 19-20** ¿Qué es una recombinación radiante y no radiante? ¿Qué tipos de materiales se usan para hacer los LED?
- 19-21** Para el germanio y el silicio, compare, a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, el número de portadores de carga por centímetro

cúbico, la fracción del total de electrones de la banda de valencia que son excitados hacia la banda de conducción, y la constante n_0 .

- 19-22** Para el germanio y el silicio, compare la temperatura requerida para duplicar la conductividad eléctrica a partir del valor de la temperatura ambiente.
- 19-23** Determine la conductividad eléctrica del silicio cuando se agrega 0.0001% de antimonio como contaminante, y compárela con la conductividad eléctrica cuando se agrega 0.0001% de indio.
- 19-24** Se desea producir un semiconductor de germanio extrínseco que tenga una conductividad eléctrica de $2000 \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. Determine la cantidad de fósforo y la cantidad de galio requerida para fabricar semiconductores tipo n y tipo p , respectivamente.
- 19-25** Estime la conductividad eléctrica del silicio contaminado con 0.0002% de arsénico a 600°C , que está arriba de la meseta de la curva de conductividad-temperatura.
- 19-26** Determine la cantidad de arsénico que debe combinarse con 1 kg de galio, para producir un semiconductor tipo p con una conductividad eléctrica de $500 \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ a 25°C . El parámetro de red del GaAs es de unos $5.65 \text{ \AA}$, y el GaAs tiene una estructura de blenda de zinc.
- 19-27** Calcule la concentración de portadores intrínsecos para el GaAs a temperatura ambiente. Dado que la masa efectiva de los electrones en el GaAs es de $0.067m_e$, donde m_e es la masa del electrón, calcule la masa efectiva de los orificios.
- 19-28** Calcule la conductividad eléctrica del silicio contaminado con 10^{18} cm^{-3} de boro a temperatura ambiente. Compare la concentración de portadores intrínsecos contra la concentración del contaminante.
- 19-29** A temperatura ambiente, ¿la conductividad del silicio contaminado con 10^{17} cm^{-3} de arsénico es mayor, igual o menor que la conductividad del silicio contaminado con 10^{17} cm^{-3} de fósforo?
- 19-30** Cuando se aplica un voltaje de 5 mV al emisor de un transistor, se produce una corriente de 2 mA. Cuando el voltaje se aumenta a 8 mV, la corriente que pasa por el colector

sube a 6 mA. ¿En qué porcentaje aumentará la corriente del colector cuando el voltaje del emisor se duplica, de 9 mV a 18 mV?

- 19-31** Diseñe un diodo emisor de luz que emita a 1.12 micrometros. ¿Esta longitud de onda está en la escala visible? ¿Cuál es una aplicación potencial para este tipo de LED?
- 19-32** ¿Cómo se pueden hacer los LED que emitan luz blanca (es decir, luz que se asemeja a la luz solar)?
- 19-33** Investigue la relación de escala conocida como Ley de Moore. ¿Se espera que esta tendencia continúe en el futuro usando técnicas establecidas de fabricación de microelectrónicos? Si no es así, ¿cuáles son algunas de las alternativas que en la actualidad se consideran? Haga una lista de las obras de consulta o sitios web que haya usted utilizado.
- 19-34** El silicio es el mejor material para el sustrato de circuitos integrados. Explique por qué el silicio se prefiere sobre el germanio, aun cuando las movilidades de electrones y orificios son mucho más altas y la brecha de banda es mucho menor para el germanio que para el silicio. Haga una lista de obras de consulta o sitios web que haya usted utilizado.

Sección 19-8 Conductividad en otros materiales

- 19-35** Calcule la conductividad eléctrica de una pieza de polietileno reforzada con fibras, que es reforzada con un 20% en volumen de fibras de níquel alineadas y continuas.
- 19-36** ¿Qué son conductores iónicos? ¿Cuáles son sus aplicaciones?
- 19-37** ¿Cómo funcionan algunas computadoras equipadas con pantallas táctiles?
- 19-38** ¿Los polímeros pueden ser semiconductores? ¿Cuáles serían las ventajas de usar éstos en lugar de silicio?

Sección 19-9 Aislantes y propiedades dieléctricas

Sección 19-10 Polarización en dieléctricos

- 19-39** Con respecto al comportamiento mecánico, se ha visto que el esfuerzo (una causa) produce una deformación (un efecto). ¿Cuál es el análogo eléctrico de esto?

- 19-40** Con respecto al comportamiento mecánico, el módulo elástico representa la energía elástica almacenada, y la disipación viscosa representa la energía mecánica perdida en deformación. ¿Cuál es el análogo eléctrico para esto?
- 19-41** Calcule el desplazamiento de electrones o iones para las siguientes condiciones:
- polarización electrónica en níquel de $2 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$;
 - polarización electrónica en aluminio de $2 \times 10^{-8} \text{ C/m}^2$;
 - polarización iónica en NaCl de $4.3 \times 10^{-8} \text{ C/m}^2$, y
 - polarización iónica en ZnS de $5 \times 10^{-8} \text{ C/m}^2$.
- 19-42** Se utiliza un dieléctrico de alúmina de 2 mm de grueso en un circuito de 60 Hz. Calcule el voltaje necesario para producir una polarización de $5 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$.
- 19-43** Suponga que es posible producir una polarización de $5 \times 10^{-8} \text{ C/m}^2$ en un cubo (5 mm por lado) de titanato de bario. Suponga una constante dieléctrica de 3 000. ¿Qué voltaje se produce?
- 19-44** ¿Qué mecanismo de polarización estará presente en a) alúmina, b) cobre, c) silicio y d) titanato de bario?

Sección 19-11 Electrostricción, piezoelectricidad y ferroelectricidad

- 19-45** Defina los siguientes términos: electrostricción, piezoelectricidad (defina sus efectos directo e inverso) y ferroelectricidad.
- 19-46** Calcule la capacitancia de un condensador de placas paralelas que contiene cinco capas de mica, para el cual la hoja de mica es de $1 \times 2 \times 0.005 \text{ cm}$. Las capas están conectadas en paralelo.
- 19-47** Un condensador de multicapas ha de diseñarse usando una formulación ferroeléctrica relajante basada en el niobato de plomo

magnesio (PMN). La constante dieléctrica aparente del material es de 20 000. Calcule la capacitancia de un condensador de multicapas formado por 10 capas conectadas en paralelo que usa electrodos de Ni. El área del condensador es de $10 \times 10 \text{ mm}$, y el grueso de cada capa es de $20 \mu\text{m}$.

- 19-48** Se aplica una fuerza de 20 lb a la cara de un cristal de cuarzo de $0.5 \times 0.5 \times 0.1 \text{ cm}$ de grueso. Determine el voltaje producido por la fuerza. El módulo de elasticidad del cuarzo es de $10.4 \times 10^6 \text{ psi}$.



Problemas de diseño

- 19-49** Se desea producir un resistor de 100 ohms usando un alambre delgado de un material. Diseñe tal dispositivo.
- 19-50** Diseñe un condensador que sea capaz de almacenar $1 \mu\text{F}$ cuando se le aplican 100 V.
- 19-51** Diseñe un compuesto de matriz epóxica que tenga un módulo de elasticidad de al menos $35 \times 10^6 \text{ psi}$ y una conductividad eléctrica de al menos $1 \times 10^5 \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$.



Problemas de cómputo

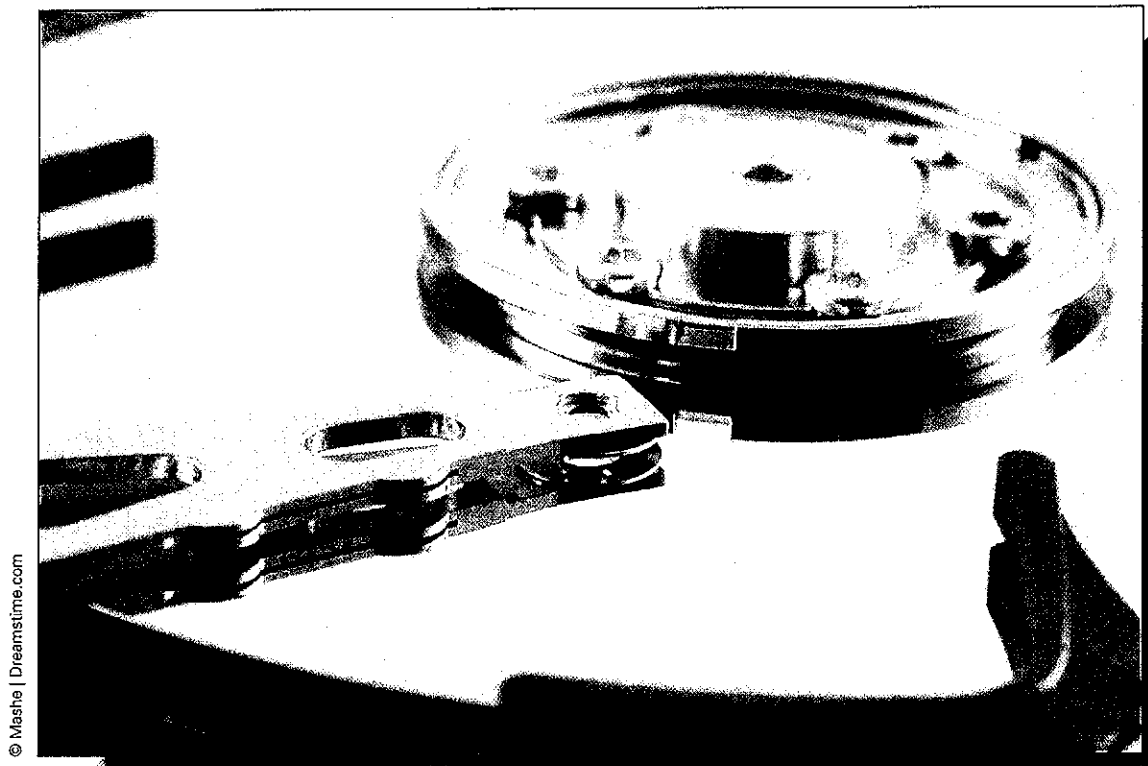
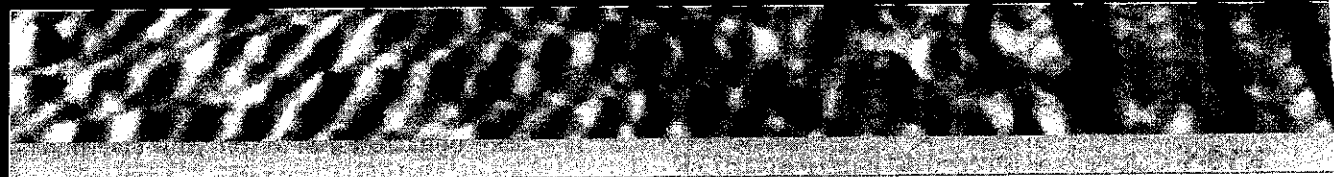
- 19-52** *Diseño de condensadores multicapas.* Escriba un programa de computadora que pueda usarse para calcular la capacitancia de un condensador de multicapas. El programa, por ejemplo, debe preguntar al usuario que le dé valores de la constante dieléctrica y de las dimensiones de la capa. El programa debe también ser flexible en que si el usuario proporciona un valor pretendido de la capacitancia y otras dimensiones, el programa debe dar la constante dieléctrica requerida.

K **Knovel® Problemas**

K19-1 Calcule la resistividad del iridio puro a 673 K usando su coeficiente de resistividad de temperatura.

K19-2 La conductividad está dada a veces en las unidades de %IACS. ¿Qué significan estas iniciales IACS? Defina la unidad usando la información encontrada.

K19-3 ¿Los materiales orgánicos, por ejemplo polímeros y nanotubos de carbono, pueden ser semiconductores? Si lo son, ¿qué determina sus propiedades como semiconductores?



© Mashe | Dreamstime.com

Un disco duro magnético es el corazón de las computadoras personales y portátiles (laptops). Estos discos usan materiales magnéticos que presentan características únicas en cuanto a que la información puede escribirse fácilmente en ellos, pero no se puede borrar con la misma facilidad. El sistema de un disco duro es complejo porque usa materiales magnéticos de película delgada nanoestructurados y a nanoescala para almacenar información.

Materiales magnéticos

¿Se ha preguntado alguna vez?

- *¿Qué materiales se utilizan para fabricar casetes de audio y de video?*
- *¿Qué afecta la "fuerza elevadora" de un imán?*
- *¿Cuáles son los materiales magnéticos "suaves" y "duros"?*
- *¿Hay materiales "no magnéticos"?*
- *¿Hay materiales que sufren deformación mecánica al someterlos a un campo magnético?*

Todos los materiales en el mundo responden a la presencia de un campo magnético. Se usan materiales magnéticos para operar en cosas como motores eléctricos, generadores y transformadores. Gran parte de la tecnología de almacenamiento de datos (discos duros de computadoras, discos de computadora, casetes de video y audio, y otros semejantes) está basada en partículas magnéticas. Los materiales magnéticos también se usan en altavoces, teléfonos, reproductores de discos compactos (CD), televisores y grabadoras de video. Los superconductores también pueden verse como materiales magnéticos. Los materiales magnéticos, por ejemplo las partículas de óxido de hierro (Fe_3O_4), se usan para hacer composiciones exóticas de "imanes líquidos" o ferrofluidos. Las mismas partículas de óxido de hierro también se usan para fijar moléculas de ADN, células y proteínas.

En este capítulo se analiza la base fundamental de las respuestas de ciertos materiales a la presencia de campos magnéticos. También se examinan las propiedades y aplicaciones de diferentes tipos de materiales magnéticos.

20-1 Clasificación de los materiales magnéticos

Estrictamente hablando, no existe ningún material “no magnético”. Todo está formado por átomos; los átomos están formados por electrones que giran alrededor de los átomos, igual que una espira portadora de corriente que genera un campo magnético. Entonces, toda la materia responde a un campo magnético. La forma en que se mide la escala de esta respuesta de electrones y átomos de un material determina si éste es muy magnético o poco magnético. Ejemplos de materiales **ferromagnéticos** son el Fe, Ni, Co y algunas de sus aleaciones. Ejemplos de materiales **ferrimagnéticos** incluyen numerosos materiales cerámicos como la ferrita de níquel zinc y la ferrita de manganeso zinc. El término “no magnético”, por lo general significa que el material no es ferromagnético ni ferrimagnético. Estos materiales “no magnéticos” se clasifican además como **diamagnéticos** (por ejemplo superconductores) o **paramagnéticos**. En algunos casos, también se encuentran materiales que son **antiferromagnéticos** o **superparamagnéticos**. Más adelante en este capítulo se verán algunas clases de materiales y sus aplicaciones. Los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos suelen ser subclasificados como materiales magnéticos blandos o duros. Los aceros al carbono puro o al hierro de alta pureza son ejemplos de material blando magnéticamente porque pueden magnetizarse, pero cuando la fuente magnetizante se retira pierden su comportamiento semejante a un imán.

Los **imanes permanentes** o **materiales magnéticos duros** retienen su magnetización. Éstos son “imanes” permanentes. Se utilizan muchas ferritas cerámicas para fabricar imanes de poco costo para refrigeradores. Un material magnético duro no pierde fácilmente su comportamiento magnético.

20-2 Dipolos magnéticos y momentos magnéticos

El comportamiento magnético de los materiales puede encontrarse en la estructura de los átomos. El movimiento orbital del electrón alrededor del núcleo y el espín del electrón alrededor de su propio eje (figura 20-1) causa momentos magnéticos separados. Estos dos movimientos (es decir, espín y orbital) contribuyen al comportamiento magnético de los materiales. Cuando el electrón gira, hay un momento magnético asociado con ese movimiento. El **momento magnético** de un electrón debido su giro se conoce como **magnetón de Bohr** (μ_B). Ésta es una constante fundamental y está definida como

$$\mu_B = \text{Magnetón de Bohr} = \frac{qh}{4\pi m_e} = 9.274 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \quad (20-1)$$

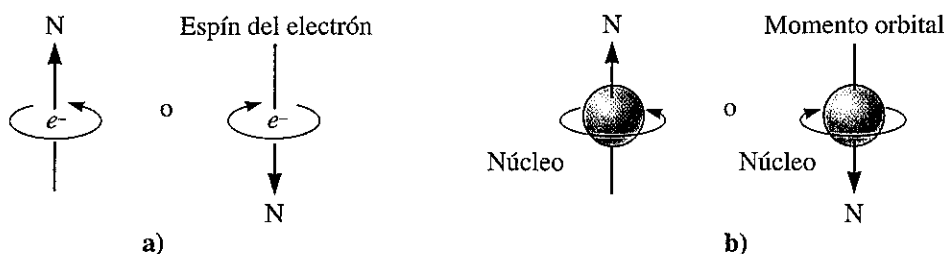


Figura 20-1 Origen de los dipolos magnéticos: a) El espín del electrón produce un campo magnético con una dirección que depende del número cuántico m_s . b) Los electrones que giran en órbita alrededor del núcleo crean un campo magnético alrededor del átomo.

La respuesta del átomo a un campo magnético aplicado depende de la forma en que los dipolos magnéticos, representados por cada átomo, reaccionan ante el campo. La mayor parte de los elementos de transición (por ejemplo Cu, Ti) reaccionan de tal manera que la suma de los momentos magnéticos de los átomos es igual a cero. Sin embargo, los átomos del níquel (Ni), el hierro (Fe) y el cobalto (Co) sufren una interacción de intercambio, por lo que la orientación del dipolo de un átomo influye sobre los átomos circundantes con la misma orientación bipolar, produciendo una amplificación deseable del efecto del campo magnético. En el caso del Fe, el Ni y el Co, los momentos magnéticos de los átomos se orientan en una sola dirección; estos materiales se conocen como materiales ferromagnéticos.

En ciertos materiales, como en el cromo CCCu (Cr), los momentos magnéticos de los átomos del centro de la celda unitaria están en oposición a los de los átomos de las esquinas, por lo que el momento neto es igual a cero. Aquellos materiales en los que exista una total cancelación de los momentos magnéticos en átomos o en iones se conocen como materiales antiferromagnéticos.

Los materiales en los que los momentos magnéticos de los distintos átomos o iones no se cancelan en su totalidad, se conocen como materiales ferrimagnéticos. Se analizarán estos materiales en una sección posterior.

20-3 Magnetización, permeabilidad y el campo magnético

Examinemos la relación entre el campo magnético y la magnetización. La figura 20-2 ilustra una bobina con n espiras. Cuando se hace pasar una corriente eléctrica por la bobina, se produce un campo magnético H ; la intensidad del campo está dada por:

$$H = \frac{nI}{l} \quad (20-2)$$

donde n es el número de vueltas, l es la longitud de la bobina (m) e I es la corriente (A). Las unidades de H son por tanto amperes vuelta/metro, o simplemente A/m. Una unidad opcional para el campo magnético es el oersted, que se obtiene al multiplicar A/m por $4\pi \times 10^{-3}$ (vea tabla 20-29).

Cuando se aplica un campo magnético en un vacío, se inducen líneas de flujo magnético. El número de líneas de flujo, llamadas densidad de flujo o *inductancia* B , está relacionado con el campo aplicado por medio de

$$B = \mu_0 H \quad (20-3)$$

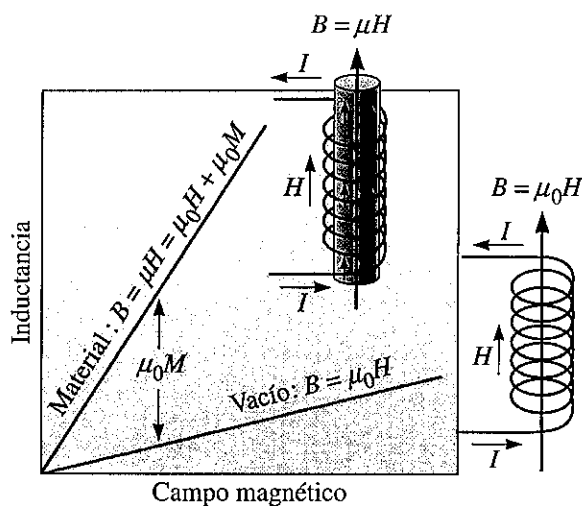


Figura 20-2

Una corriente que pasa por una bobina establece un campo magnético H , con una densidad de flujo B . La densidad de flujo aumenta si se coloca un núcleo magnético dentro de la bobina.

TABLA 20-2 ■ Unidades, conversiones y valores para materiales magnéticos

	(Unidades electromagnéticas) de Gauss y cgs	Unidades SI	Conversión
Inductancia o densidad de flujo magnético (B)	Gauss (G)	Tesla [o weber (Wb)/m ²]	1 tesla = 10 ⁴ G, Wb/m ²
Flujo magnético (ϕ)	Maxwell (Mx), G-cm ²	Wb, volt-segundo	1 Wb = 10 ⁸ G-cm ²
Diferencia de potencial magnético o fuerza electromotriz magnética ($\mathcal{U}$, $\mathcal{F}$)	Gilbert (Gb)	ampere (A)	1 A = 4 π $\times$ 10 ⁻¹ Gb
Fuerza del campo magnético o fuerza magnetizadora (H)	Oersted (Oe), gilbert (Gb)/cm	A/m	1 A/m = 4 π $\times$ 10 ⁻³ Oe
(Volumen) magnetización (M)	uem/cm ³	A/m	1 A/m = 10 ⁻³ uem/cm ³
(Volumen) magnetización (4 πM)	G	A/m	1 A/m = 4 π $\times$ 10 ⁻³ G
Polarización magnética o intensidad de magnetización (J o I)	uem/cm ³	T, Wb/m ²	1 tesla = (1/4 π) $\times$ 10 ⁴ uem/cm ³
(Masa) magnetización (σ , M)	uem/g	A-m ² /kg Wb-m/kg	1 A-m ² /kg = 1 uem/g 1 Wb-m/kg = (1/4 π) $\times$ 10 ⁷ uem/g
Momento magnético (m)	uem, erg/G	A-m ² , Joules por tesla (J/T)	1 J/T = 10 ³ uem
Momento de dipolo magnético (j)	uem, erg/G	Wb-m	1 Wb-m = (1/4 π) $\times$ 10 ¹⁰ uem
Permeabilidad magnética (μ)	Sin dimensiones	Wb/(A $\cdot$ m) [henry (H)/m]	1 Wb/(A $\cdot$ m) = (1/4 π) $\times$ 10 ⁷
Permeabilidad magnética del espacio libre (μ_0)	1 gauss/oersted	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m	
Permeabilidad relativa (μ_r)	No definido	Sin dimensiones	
(Volumen) densidad de energía, producto de energía (W)	erg/cm ³	J/m ³	1 J/m ³ = 10 erg/cm ³

donde B es la inductancia, H es el campo magnético y μ_0 es una constante llamada **permeabilidad magnética del vacío**. Si H se expresa en unidades de oersted, entonces B está en gauss y μ_0 es 1 gauss/oersted. En un conjunto de unidades alterno, H está en A/m, B está en tesla (también llamado weber/m²) y μ_0 es 4 $\pi \times 10^{-7}$ weber/(A $\cdot$ m) (también llamada henry/m).

Cuando se coloca un material dentro del campo magnético, la densidad del flujo magnético queda determinada por la forma en la que los dipolos magnéticos, inducidos y permanentes, interactúan con el campo. La densidad de flujo ahora es

$$B = \mu H \quad (20-4)$$

donde μ es la permeabilidad del material dentro del campo. Si los momentos magnéticos refuerzan el campo aplicado, entonces $\mu > \mu_0$, se crea un número mayor de líneas de flujo que pueden realizar trabajo y se amplifica el campo magnético. No obstante, si los momentos magnéticos se oponen al campo, $\mu < \mu_0$.

Se puede describir la influencia del material magnético mediante la permeabilidad relativa μ_r , donde

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (20-5)$$

Una permeabilidad relativa grande significa que el material amplifica el efecto del campo magnético. Entonces, la permeabilidad relativa tiene la misma importancia que la conductividad en los dieléctricos. Un material con una permeabilidad magnética más elevada (por ejemplo, el hierro) acepta el flujo magnético con más facilidad. Posteriormente, se verá que la permeabilidad de los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos no es constante y depende del valor del campo magnético aplicado (H).

La **magnetización** M representa el aumento en la inductancia debida al material del núcleo, de modo que se puede reescribir la ecuación para la inductancia como

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (20-6)$$

La primera parte de esta ecuación es simplemente el efecto del campo magnético aplicado; la segunda, es el efecto del material magnético presente. Esto se parece al análisis hecho sobre la polarización dieléctrica y el comportamiento mecánico de los materiales. En éstos, los esfuerzos causan deformaciones, los campos eléctricos (E) inducen una polarización dieléctrica (P) y un campo magnético (H) causa magnetización ($\mu_0 M$) que contribuye a la densidad de flujo total B .

La **susceptibilidad magnética** χ_m , que es la razón entre la magnetización y el campo aplicado, da la amplificación producida por el material:

$$\chi_m = \frac{M}{H} \quad (20-7)$$

Tanto μ_r como χ_m se refieren al grado en el que el material aumenta el campo magnético y están, por tanto, relacionadas por

$$\mu_r = 1 + \chi_m \quad (20-8)$$

Como ya se vio antes, μ_r y, por tanto, los valores de χ_m para materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos dependen del campo aplicado (H). Para materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos, el término $\mu_0 M \gg \mu_0 H$. Entonces, para estos materiales,

$$B \cong \mu_0 M \quad (20-9)$$

A veces nos referimos indistintamente a la inductancia o a la magnetización. En general, hay interés en producir una elevada inductancia B o magnetización M . Esto se logra al seleccionar materiales que tengan una permeabilidad relativa alta o una susceptibilidad magnética alta.

El siguiente ejemplo muestra la forma en que estos conceptos pueden aplicarse para comparar magnetizaciones reales y teóricas en el hierro puro.

Ejemplo 20-1

Magnetización de saturación teórica y real en el Fe

Calcule la magnetización máxima, o saturación, que se puede esperar en el hierro. El parámetro de la red del hierro CCCu es de 2.866 Å. Compare este valor con 2.1 teslas (valor de la densidad de flujo de saturación observado de manera experimental en el Fe puro).

SOLUCIÓN

Con base en los espines electrónicos impares, se espera que cada átomo de hierro tenga cuatro electrones que actúan como dipolos magnéticos. El número de átomos por m^3 en el hierro CCCu es

$$\text{Número de átomos de Fe/m}^3 = \frac{2 \text{ átomos/celda}}{(2.866 \times 10^{-10} \text{ m})^3} = 8.496 \times 10^{28}$$

La magnetización máxima por volumen (M_{sat}) es el momento magnético total por unidad de volumen:

$$M_{\text{sat}} = \left(8.496 \times 10^{28} \frac{\text{átomos}}{\text{m}^3} \right) (9.274 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2) \left(4 \frac{\text{magnetones de Bohr}}{\text{átomo}} \right)$$

$$M_{\text{sat}} = 3.15 \times 10^6 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Para convertir el valor de la magnetización de saturación M en densidad de flujo por saturación B en tesla, es necesario conocer el valor de $\mu_0 M$. En materiales ferromagnéticos, $\mu_0 M \gg \mu_0 H$ y por tanto, $B \cong \mu_0 M$.

Entonces, la inducción por saturación o densidad de flujo por saturación en tesla está dada por $B_{\text{sat}} = \mu_0 M_{\text{sat}}$.

$$B_{\text{sat}} = \left(4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Wb}}{\text{A} \cdot \text{m}} \right) \left(3.15 \times 10^6 \frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$$

$$B_{\text{sat}} = 3.96 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = 3.96 \text{ teslas}$$

Esto es casi dos veces más que el valor observado experimentalmente de 2.1 teslas. Si se invierten los cálculos, se puede demostrar que cada átomo de hierro contribuye con sólo alrededor de 2.1 magnetones de Bohr y no 4. Ésta es la diferencia entre el comportamiento de átomos individuales y el de un cristal sólido. Se puede demostrar que, en el caso del hierro, la diferencia se debe al momento orbital de los electrones $3d$ que está siendo anulado en el cristal.

20-4 Materiales diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, ferrimagnéticos y superparamagnéticos

Como ya se dijo antes, no existe un material “no magnético”. Todos los materiales responden a los campos magnéticos. Cuando se aplica un campo magnético a un material, se observan varios tipos de comportamiento (figura 20-3).

Comportamiento diamagnético Un campo magnético que actúa sobre cualquier átomo induce un dipolo magnético para todo el átomo, al influir en el campo magnético causado por los electrones de sus órbitas. Estos dipolos se oponen al campo magnético, haciendo que la magnetización sea menor a cero. Este comportamiento, llamado **diamagnetismo**, da una permeabilidad relativa de unos 0.99995 (o susceptibilidad negativa de alrededor de -10^{-6} ; observe el signo negativo). Materiales como el cobre, la plata, el silicio, el oro y la alúmina son diamagnéticos a temperatura ambiente. Los superconductores son diamagnéticos perfectos ($\chi_m = -1$); pierden su superconductividad a temperaturas más altas o en presencia de un campo magnético. En un material diamagnético, la dirección de magnetización (M) es opuesta a la dirección del campo aplicado (H).

Paramagnetismo Cuando los materiales tienen electrones impares, a cada átomo se asocia un momento magnético neto debido al giro de los electrones. Al aplicarse un campo

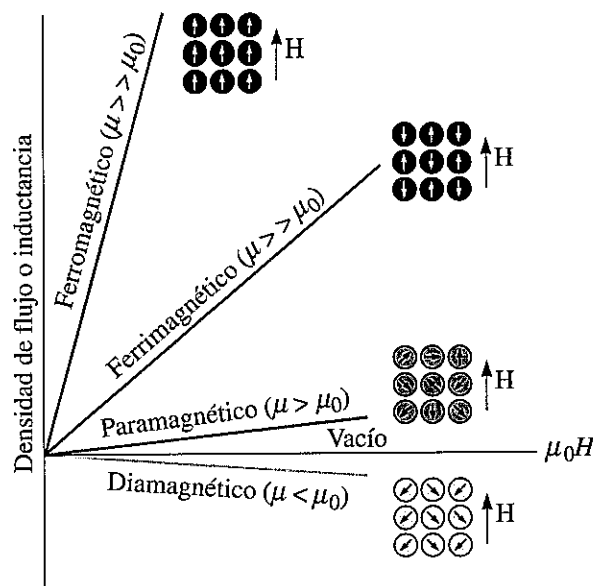


Figura 20-3

Efecto del material del núcleo sobre la densidad de flujo. En materiales diamagnéticos, el momento magnético se opone al campo. Para una misma intensidad de campo se presentan momentos cada vez más elevados en los materiales paramagnéticos, ferrimagnéticos y ferromagnéticos.

magnético, los dipolos quedan alineados con el campo, causando una magnetización positiva. Como los dipolos no interactúan, se requieren campos magnéticos extremadamente grandes para alinear todos los dipolos. Además, el efecto se pierde tan pronto como se retira el campo magnético. Este efecto, llamado **paramagnetismo**, se encuentra en metales como el aluminio, el titanio y las aleaciones de cobre. La susceptibilidad magnética (χ_m) de los materiales paramagnéticos es positiva y se encuentra entre 10^{-4} y 10^{-5} . Los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos arriba de la temperatura de Curie también presentan comportamiento paramagnético.

Ferromagnetismo El comportamiento ferromagnético es causado por los niveles de energía no totalmente ocupados en el nivel $3d$ del hierro, el níquel y el cobalto. También se observa un comportamiento similar en otros materiales, incluyendo el gadolinio (Gd). En materiales ferromagnéticos, los dipolos impares permanentes quedan alineados con facilidad con el campo magnético impuesto debido a la interacción de intercambio, o refuerzo mutuo de los dipolos. Se obtienen grandes magnetizaciones incluso para campos magnéticos pequeños, dando grandes susceptibilidades que se aproximan a 10^6 . De manera similar a los ferroeléctricos, la susceptibilidad de los materiales ferromagnéticos depende de la intensidad del campo magnético aplicado. Esto es semejante al comportamiento mecánico de los elastómeros con el módulo de elasticidad dependiente del nivel de deformación. Arriba de la temperatura de Curie, los materiales ferromagnéticos se comportan como materiales paramagnéticos y su susceptibilidad está dada por la siguiente ecuación, conocida como ley de Curie-Weiss:

$$\chi_m = \frac{C}{(T - T_c)} \quad (20-10)$$

En esta ecuación, C es una constante que depende del material, T_c es la temperatura de Curie y T es la temperatura arriba de T_c . En esencia, la misma ecuación también describe el cambio en la permitividad dieléctrica de los ferroeléctricos arriba de la temperatura de Curie. En forma semejante a los ferroeléctricos, los materiales ferromagnéticos presentan la formación de dominios de ciclo de histéresis y dominios magnéticos. Estos materiales se estudiarán en la sección siguiente.

Antiferromagnetismo En materiales como el manganeso, el cromo, el MnO y el NiO , los momentos magnéticos producidos en dipolos cercanos quedan alineados en

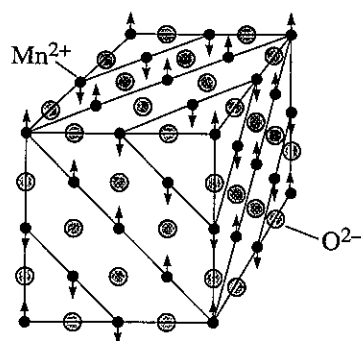


Figura 20-4

La estructura de cristal del MnO está formada por capas alternas de planos del tipo {111} de iones de oxígeno y manganeso. Los momentos magnéticos de los iones de manganeso en cada plano alterno {111} están alineados en oposición. En consecuencia, el MnO es antiferromagnético.

oposición a algún otro en el campo magnético, incluso si la fuerza de cada dipolo es muy alta. Este efecto se ilustra para el MnO en la figura 20-4. Estos materiales son **antiferromagnéticos** y tienen una magnetización igual a cero. La susceptibilidad magnética es positiva y pequeña. Además, el CoO y el MnCl₂ son ejemplos de materiales antiferromagnéticos.

Ferrimagnetismo En materiales cerámicos, diferentes iones tienen distintos momentos magnéticos. En un campo magnético, los dipolos del catión *A* pueden alinearse con el campo, en tanto que los dipolos del catión *B* se oponen al campo. Pero, debido a que la intensidad o el número de dipolos no son iguales, resulta una magnetización neta. Los materiales **ferrimagnéticos** pueden dar buena amplificación del campo impuesto. En una sección posterior se verá un grupo de materiales cerámicos llamados ferritas que presentan este comportamiento. Estos materiales muestran una susceptibilidad magnética, dependiendo del campo magnético que es similar a la de los materiales ferromagnéticos. También muestran un comportamiento de Curie-Weiss (similares a materiales ferromagnéticos) a temperaturas arriba de la temperatura de Curie. La mayor parte de los materiales ferrimagnéticos son cerámicos y buenos aislantes de la electricidad. Entonces, en estos materiales, las pérdidas eléctricas (conocidas como pérdidas por corrientes parásitas) son mucho menores en comparación con las de los materiales ferromagnéticos metálicos. Es por esto que las ferritas se utilizan en numerosas aplicaciones de alta frecuencia.

Superparamagnetismo Cuando el tamaño del grano de los materiales ferromagnéticos y de los ferrimagnéticos disminuye por debajo de cierto tamaño crítico, estos materiales se comportan como si fueran paramagnéticos. La energía del dipolo magnético de cada partícula se vuelve comparable a la energía térmica. Este pequeño momento magnético cambia su dirección de manera aleatoria (como resultado de la energía térmica). Es por eso que el material se comporta como si no tuviera un momento magnético neto. Esto se conoce como superparamagnetismo. Entonces, si se producen partículas de óxido de hierro (Fe₃O₄) de un tamaño de 3 a 5 nm, se comportan como materiales superparamagnéticos. Estas partículas superparamagnéticas de óxido de hierro se utilizan para formar dispersiones en las fases portadoras acuosas u orgánicas, o para formar "imanes líquidos" o ferrofluidos. Las partículas en el fluido se mueven en respuesta a un gradiente en el campo magnético. Dado que las partículas forman una solución estable, se mueve toda la dispersión y, entonces, el material se comporta como un imán líquido. Estos tipos de materiales se utilizan en los sellos de las unidades de disco duro de las computadoras y en los altoparlantes como medios de transferencia térmica (de enfriamiento). El imán permanente utilizado en un altoparlante mantiene los imanes líquidos en su lugar. Las partículas superparamagnéticas del óxido de hierro (Fe₃O₄) también pueden recubrirse con diferentes productos químicos y utilizarse para separar moléculas, proteínas y células del ADN de otras moléculas.

El siguiente ejemplo ilustra cómo debe seleccionarse un material para una aplicación dada.

Ejemplo 20-2**Diseño y selección de materiales para un solenoide**

Se desea construir una bobina solenoide que produzca una inductancia de al menos 2 000 gauss, cuando por el conductor pase una corriente de 10 mA. Debido a limitaciones de espacio, la bobina debe estar compuesta por 10 vueltas en una longitud de 1 cm. Seleccione un material para el núcleo de la bobina.

SOLUCIÓN

Primero, se puede determinar el campo magnético H producido por la bobina. De la ecuación 20-2,

$$H = \frac{nI}{l} = \frac{(10)(0.01 \text{ A})}{0.01 \text{ m}} = 10 \text{ A/m}$$

$$H = (10 \text{ A/m})[4\pi \times 10^{-3} \text{ oersted/(A/m)}] = 0.12566 \text{ oersted}$$

Si la inductancia B debe ser al menos de 2 000 gauss, entonces la permeabilidad del material del núcleo debe ser

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{2\,000}{0.12566} = 15\,916 \text{ gauss/oersted}$$

La permeabilidad relativa del material del núcleo debe ser al menos

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{15\,916}{1} = 15\,916$$

Si se examinan los materiales magnéticos de la tabla 20-4, se encuentra que la aleación 4 750 tiene una permeabilidad relativa máxima de 80 000 y podría ser una buena selección para el material del núcleo.

20-5 Estructura del dominio y el ciclo de histéresis

Desde un punto de vista fenomenológico, los materiales ferromagnéticos son similares a los ferroeléctricos. Un cristal de hierro o una pieza policristalina de acero al bajo carbono son ferromagnéticos, pero normalmente no muestran una magnetización neta. Dentro del monocristal o de la estructura policristalina de un material, ferromagnético o ferrimagnético, se produce una subestructura compuesta de dominios magnéticos, incluso en ausencia de un campo externo. Esto ocurre porque la presencia de numerosos dominios en el material, organizados de manera que la magnetización neta sea cero, reduce al mínimo la energía magnetoestática. Los **dominios** son regiones dentro del material en las que todos los dipolos están alineados en cierta dirección. En un material que nunca haya sido expuesto a un campo magnético, los dominios individuales tienen orientaciones al azar. Debido a esto, la magnetización neta en un material ferromagnético o ferrimagnético virgen es en su totalidad igual a cero [figura 20-5a)]. Al igual que en el caso de los materiales ferroeléctricos, la aplicación de un campo magnético (polarización) obligará a muchos de los dominios magnéticos a alinearse con la dirección del campo magnético.

Los límites, conocidos como **paredes de Bloch**, separan los dominios magnéticos individuales. Las paredes de Bloch son zonas angostas en las que la dirección del momento magnético cambia gradual y continuamente, desde el correspondiente a un dominio hasta el siguiente [figura 20-5b)]. Los dominios son por lo general muy pequeños, de unos 0.005 cm o menos, en tanto que las paredes de Bloch son de unos 100 nm de grueso.

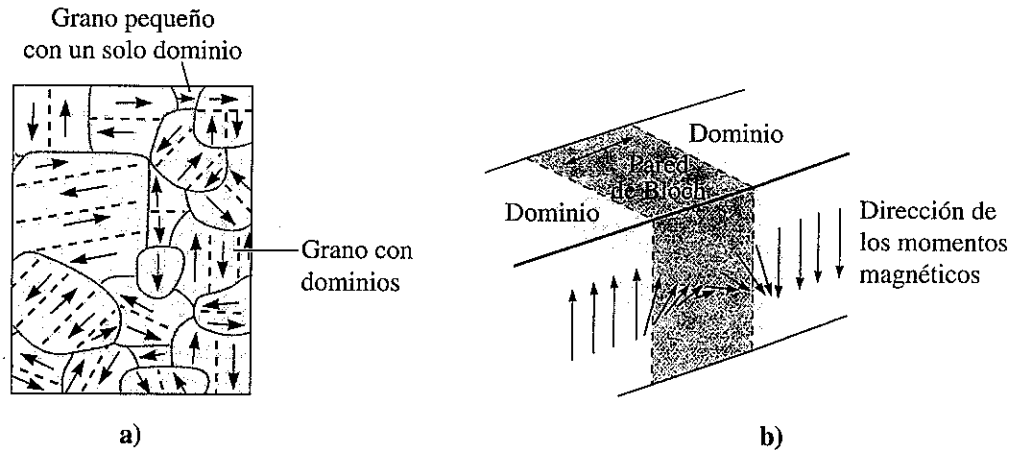


Figura 20-5 a) Esquema cualitativo de los dominios magnéticos en un material policristalino. Las líneas interrumpidas muestran la demarcación entre diferentes dominios magnéticos; las curvas muestran los límites de grano. b) Los momentos magnéticos cambian de dirección continuamente a través de los límites entre dominios.

Movimiento de los dominios en un campo magnético Cuando se impone un campo magnético sobre el material, los dominios que están prácticamente alineados en relación con el campo crecen a expensas de los dominios no alineados. Para que crezcan los dominios, las paredes de Bloch deben moverse; el campo proporciona la fuerza requerida para este movimiento. Inicialmente, los dominios crecen con dificultad y se requieren grandes incrementos en el campo para producir apenas un poco de magnetización. Esto se presenta en la figura 20-6 en forma de una pendiente reducida, ya que es la permeabilidad inicial del material. Conforme aumenta la intensidad del campo, los dominios con orientación favorable crecen con mayor facilidad y, al mismo tiempo, se incrementa también la permeabilidad. Se puede definir una permeabilidad máxima como se muestra en la figura. En última instancia, los dominios con orientación desfavorable desaparecen y la rotación completará la alineación de los dominios en el campo. La **magnetización de saturación**, que se produce

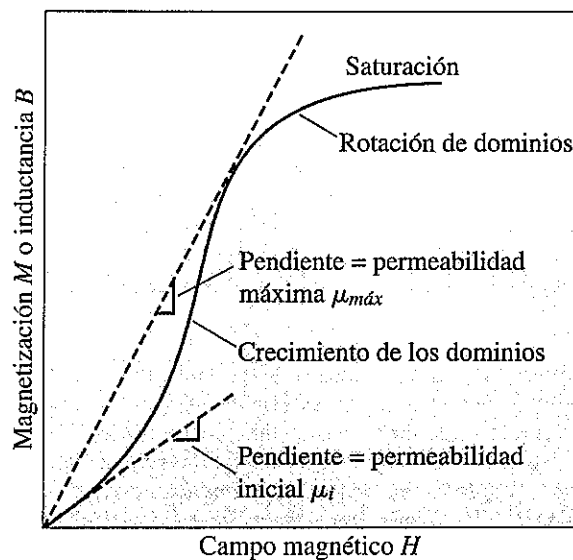


Figura 20-6 Cuando a un material magnético se le aplica un campo magnético por primera vez, la magnetización aumenta con lentitud y después más rápido conforme los dominios empiezan a crecer. Posteriormente, la magnetización pierde rapidez porque al final los dominios deben girar para alcanzar la saturación. Observe que los valores de la permeabilidad dependen de la magnitud de H .

cuando todos los dominios están orientados en dirección al campo magnético, es la magnetización más elevada que puede lograrse en el material. Bajo estas condiciones, la permeabilidad de estos materiales se vuelve realmente pequeña.

Efecto de eliminar el campo Cuando se elimina el campo magnético, la resistencia que ofrecen las paredes de dominios impide que éstos vuelvan a crecer con orientaciones aleatorias. En consecuencia, gran parte de los dominios quedan orientados cerca de la dirección del campo original y una magnetización residual, que se conoce como **remanencia** (M_r), se encuentra presente en el material. El valor de B_r (por lo general en teslas), se conoce como retentividad del material magnético. El material se comporta como un imán permanente. La figura 20-7a) muestra este efecto en la curva magnetización-campo. Obsérvese que el ciclo $M-H$ muestra saturación, no así el ciclo $B-H$. El campo magnético que se necesita para llevar la magnetización inducida a un valor cero se conoce como **coercitividad** del material. Ésta es una propiedad sensible a la microestructura.

Para los materiales magnéticos para grabación, se utilizan partículas de Fe , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, Fe_3O_4 , así como partículas de CrO_2 en forma de aguja. La forma alargada de las partículas magnéticas lleva a una coercitividad más elevada (H_c). La dependencia de la coercitividad (H_c) sobre la forma de una partícula o de un grano se conoce como **anisotropía magnética de forma**. La coercitividad de los materiales para grabar necesita ser más pequeña que la correspondiente a los imanes permanentes, en vista de que los datos escritos en un medio magnético de almacenamiento deben poder borrarse. Por otra parte, los valores de la coercitividad deben ser superiores a los correspondientes a los materiales magnéticos blandos, dado que se desea conservar la información almacenada. Este tipo de materiales se describe como magnéticamente semiduro.

Efecto de invertir el campo Si ahora se aplica un campo en la dirección inversa, los dominios crecen con una alineación en la dirección opuesta. Se requiere un campo coercitivo H_c para obligar a los dominios a adoptar una orientación aleatoria y que se cance-

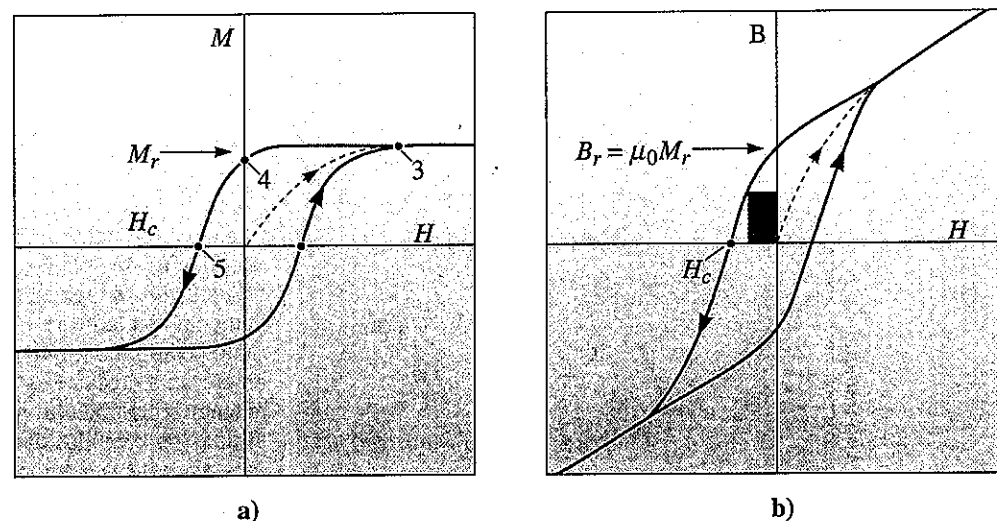


Figura 20-7 a) Ciclo de histéresis $M-H$ que muestra el efecto del campo magnético sobre la inductancia o magnetización. Al alinearse los dipolos se alcanza la magnetización de saturación (punto 3), una remanencia (punto 4) y un campo coercitivo (punto 5). b) El ciclo $B-H$ correspondiente. Obsérvese el fin del ciclo $B-H$: el valor B no alcanza la saturación puesto que $B = \mu_0 H + \mu_0 M$. (Fuente: Adaptada de *Permanent Magnetism*, por R. Skomski y J.M.D. Coey, p. 3, fig. 1-1. Editada por J.M.D. Coey y D.R. Tilley. Copyright © 1999 Institute of Physics Publishing. Adaptado con autorización.)

len entre sí. Con incrementos adicionales en la intensidad del campo, los dominios finalmente se alinearán hasta la saturación en la dirección opuesta.

Como el campo continuamente cambia de sentido, la relación entre magnetización y campo traza un **ciclo de histéresis**. Éste aparece en ambos trazos ($B-H$ y $M-H$). El área contenida en el interior del ciclo de histéresis se relaciona con la energía consumida durante un ciclo del campo alternante. El área sombreada que aparece en la figura 20-7b) representa el producto $B-H$ y se conoce como la potencia del material magnético.

20-6 La temperatura de Curie

Cuando se incrementa la temperatura de un material ferromagnético o ferrimagnético, la energía térmica adicional incrementa la movilidad de los dominios, facilitándoles su alineación pero también impidiéndoles que se conserven alineados cuando se elimina el campo. En consecuencia, tanto la magnetización de saturación como la remanencia y el campo coercitivo disminuyen todos a temperaturas elevadas (figura 20-8). Si la temperatura excede la **temperatura de Curie** (T_c), ya no se presenta un comportamiento ferromagnético o ferrimagnético. En cambio, el material se comporta como paramagnético. La temperatura de Curie (tabla 20-3), que depende del material, puede modificarse utilizando elementos de aleación. Los científicos franceses Marie y Pierre Curie (el único matrimonio en obtener un premio Nobel; Marie Curie en realidad ganó dos premios Nobel) hicieron investigaciones sobre los imanes, y la temperatura de Curie hace honor a sus nombres. Los dipolos pueden de todas maneras alinearse en un campo magnético por encima de la temperatura de Curie, pero quedan alineados de manera aleatoria al eliminar el campo magnético.

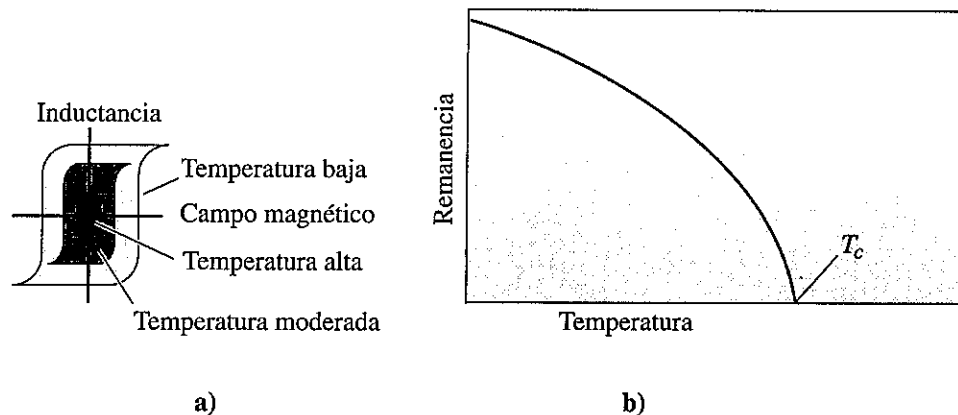


Figura 20-8 Efecto de la temperatura sobre a) el ciclo de histéresis y b) la remanencia. El comportamiento ferromagnético desaparece por encima de la temperatura de Curie.

TABLA 20-3 ■ Temperaturas de Curie para materiales seleccionados

Material	Temperatura de Curie (°C)	Material	Temperatura de Curie (°C)
Gadolinio	16	Hierro	771
Nd ₂ Fe ₁₂ B	312	Alnico 1	780
Níquel	358	Cunico	855
BaO · 6Fe ₂ O ₃	469	Alnico 5	900
Co ₅ Sm	747	Cobalto	1 117

20-7 Aplicaciones de los materiales magnéticos

Los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos se clasifican como magnéticamente blandos o duros, dependiendo de la forma de su ciclo de histéresis [figura 20-9a)]. En general, si el valor de la coercitividad es $\sim > 10^4 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$, se considera al material como magnéticamente duro. Si los valores de la coercitividad son inferiores a $10^3 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$, se considera a los materiales como magnéticamente blandos. La figura 20-9b) muestra la clasificación de distintos materiales magnéticos importantes desde un punto de vista comercial. Obsérvese que mientras que la coercitividad es una propiedad muy *sensible a la microestructura*, la magnetización de saturación es constante (es decir, no depende de la microestructura) para un material de una composición dada. Esto es semejante a la forma en que los materiales metálicos dependen, en gran medida, de la microestructura, no así el módulo de Young. Los valores de la coercitividad se

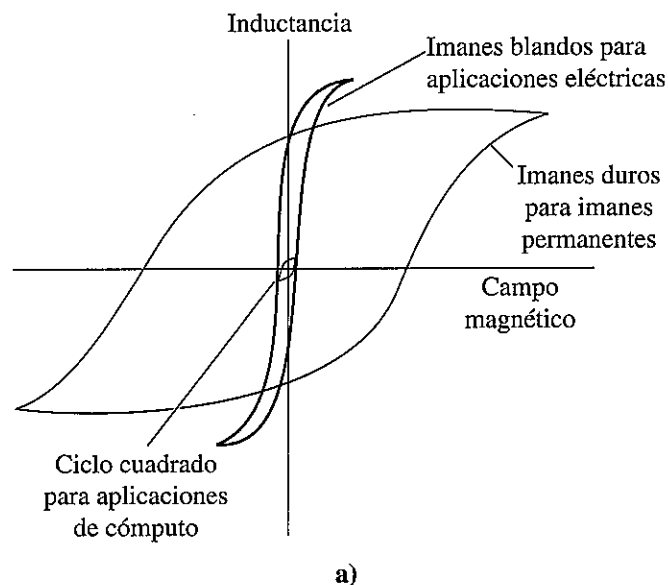
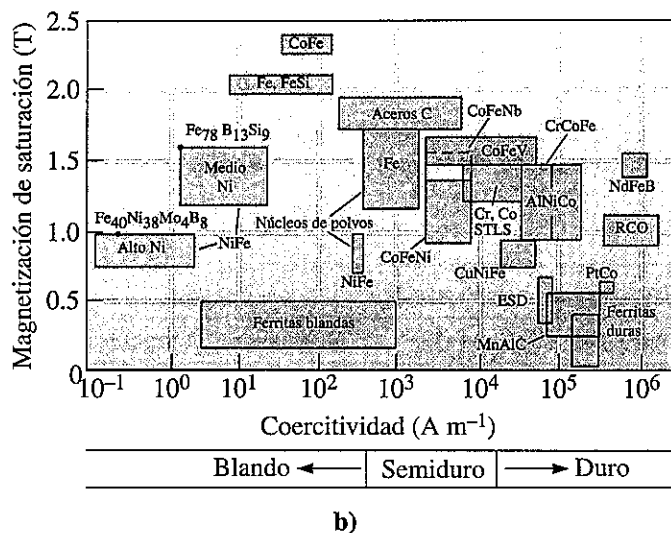


Figura 20-9

a) Comparación de los ciclos de histéresis para tres aplicaciones de materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos. b) Valores de magnetización de saturación y de coercitividad para diferentes materiales magnéticos. (Fuente: Adaptada de "Magnetic Materials: An Overview, Basic Concepts, Magnetic Measurements, Magnetostrictive Materials", por G.Y. Chin et al. En D. Bloor, M. Flemings y S. Mahajan (eds.), Encyclopedia of Advanced Materials, vol.1, 1994, p. 1424, tabla 1. Copyright © 1994 Pergamon Press. Reproducida con autorización del editor.)



ven afectados por numerosos factores, como la estructura de los límites de grano y la presencia de poros o de capas superficiales en las partículas, por ejemplo. La coercitividad de los monocristales depende de manera muy importante de la orientación cristalográfica. Existen ciertas direcciones a lo largo de las cuales es fácil alinear los dominios magnéticos. Hay otras direcciones a lo largo de las cuales la coercitividad es mucho más alta. La coercitividad de las partículas magnéticas también depende de la forma de las mismas. Ésta es la razón por la cual en los medios magnéticos de grabación se utilizan partículas aciculares y no esféricas. Este efecto también se utiliza en los aceros Fe-Si, que están orientados en forma de granos o de textura, a fin de reducir al mínimo las pérdidas de energía durante la operación de un transformador eléctrico.

En seguida se verán algunas aplicaciones para los materiales magnéticos.

Materiales magnéticos blandos Los materiales ferromagnéticos se utilizan con frecuencia para mejorar la densidad del flujo magnético (B) producida cuando se hace pasar una corriente eléctrica por el material. Entonces se espera que el campo magnético realice trabajo. Entre sus aplicaciones se deben mencionar los núcleos para electroimanes, los motores eléctricos, los transformadores, los generadores y otros equipos eléctricos. Dado que estos dispositivos utilizan un campo alternativo, el material del núcleo está sometido continuamente a los valores incluidos en el ciclo de histéresis. La tabla 20-4 muestra las propiedades de materiales magnéticos blandos, seleccionados. *Obsérvese que, en estos materiales, el valor de la permeabilidad magnética relativa depende de manera determinante de la intensidad del campo aplicado* (figura 20-6).

Estos materiales tienen a menudo las siguientes características:

1. Magnetización de alta saturación.
2. Alta permeabilidad.
3. Pequeño campo coercitivo.

TABLA 20-4 ■ Propiedades de materiales magnéticos blandos seleccionados

Nombre	Composición	Permeabilidad μ_r		Coercitividad H_c (A · m ⁻¹)	Retentividad B_r (T)	$B_{m\text{áx}}$ (T)	Resistividad ($\mu\Omega \cdot \text{m}$)
		Inicial	Máxima				
Hierro en lingotes	99.8% Fe	150	5 000	80	0.77	2.14	0.10
Acero al bajo carbono	99.5% Fe	200	4 000	100		2.14	1.12
Hierro al silicio, sin orientación	Fe-3% Si	270	8 000	60		2.01	0.47
Hierro al silicio, de grano orientado	Fe-3% Si	1400	50 000	7	1.20	2.01	0.50
Aleación 4750	Fe-48% Ni	11 000	80 000	2		1.55	0.48
Permalloy 4-79	Fe-4% Mo-79% Ni	40 000	200 000	1		0.80	0.58
Superalloy	Fe-5% Mo-80% Ni	80 000	450 000	0.4		0.78	0.65
Permendur 2-V	Fe-2% V-49% Co	800	450 000	0.4		0.78	0.65
Supermendur	Fe-2% V-49% Co		100 000	16	2.00	2.30	0.40
Metglas ^a 2650SC	Fe ₈₁ B _{13.5} Si _{3.5} C ₂		300 000	3	1.46	1.61	1.35
Metglas ^a 2650S-2	Be ₇₈ B ₁₃ S ₉		600 000	2	1.35	1.56	1.37
Ferrita MnZn	H5C2 ^b	10 000		7	0.09	0.40	1.5×10^5
Ferrita MnZn	H5E ^b	18 000		3	0.12	0.44	5×10^4
Ferrita NiZn	K5 ^b	290		80	0.25	0.33	2×10^{12}

^aMarca registrada de Allied Corporation.

^bCódigo de ferrita TDK.

(Adaptada de "Magnetic Materials: An Overview, Basic Concepts, Magnetic Measurements, Magnetostrictive Materials", por G.Y. Chin et al. En R. Bloor, M. Flemings y S. Mahajan (eds.), Encyclopedia of Advanced Materials, vol. 1, 1994, p. 1424, tabla 1. Copyright © 1994 Pergamon Press. Reproducida con autorización del editor.)

4. Remanencia pequeña.
5. Ciclo de histéresis pequeño.
6. Respuesta rápida a campos magnéticos de alta frecuencia.
7. Resistividad eléctrica elevada.

Una magnetización de saturación alta permite que el material realice trabajo, en tanto que una elevada permeabilidad hace posible la obtención de la magnetización de saturación con campos magnéticos impuestos de valor reducido. Un campo coercitivo pequeño también indica que los dominios se pueden reorientar utilizando campos magnéticos reducidos. Es deseable tener una pequeña remanencia, de forma que cuando se elimine el campo externo prácticamente no quede nada de remanencia. Estas características también conducen a un ciclo de histéresis pequeño y, por tanto, a minimizar las pérdidas de energía durante la operación.

Si la frecuencia del campo aplicado es tan elevada que los dominios no tienen tiempo para realinearse en cada ciclo, el dispositivo posiblemente se calentará debido a la fricción dipolar. Además, las frecuencias más elevadas producen de forma natural más calentamiento, debido a que el material pasa por un ciclo con mayor frecuencia a través del ciclo de histéresis, perdiendo más energía en cada ciclo. Para aplicaciones de alta frecuencia, los materiales deben permitir que los dipolos queden alineados con rapidez excepcionalmente alta.

También es posible perder energía por calentamiento si se producen corrientes parásitas. Durante la operación, se pueden inducir corrientes eléctricas en el material magnético. Estas corrientes producen pérdidas de potencia y calentamiento en joules, es decir I^2R . Las pérdidas por corrientes parásitas son particularmente severas cuando el material opera a frecuencias elevadas. Si la resistividad eléctrica es alta, estas corrientes parásitas se pueden limitar a un valor mínimo. Los imanes blandos producidos con materiales cerámicos ferrimagnéticos tienen una elevada resistividad y, por tanto, es menos probable que se calienten en comparación con los materiales ferromagnéticos metálicos. En tiempos recientes, una clase de materiales inteligentes conocidos como fluidos magnetorreológicos, o MR, se ha utilizado en varias aplicaciones relacionadas con el control de vibraciones, por ejemplo el sistema Magne-Ride™ de Delphi. Estos materiales son como pinturas magnéticas y es posible que absorban energía de choques y vibraciones al activar un campo magnético. La rigidización de los fluidos MR es controlable y reversible. Algunos de los modelos de Cadillac y Corvette están equipados con una suspensión basada en estos materiales inteligentes.

Materiales para almacenamiento de datos Los materiales magnéticos se utilizan para el almacenamiento de datos. Se almacena la memoria magnetizando un material en cierta dirección. Por ejemplo, si el polo "norte" está activo, el bit de información almacenado es igual a 1. Si el polo "norte" no está activo, entonces lo que se almacena es un 0.

Para esta aplicación, son preferibles los materiales con un ciclo de histéresis cuadrado, una remanencia baja, una magnetización por saturación también baja y un campo coercitivo reducido. Las ferritas duras basadas en Ba, CrO_2 , partículas aciculares de hierro y $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ satisfacen estos requisitos. La cinta magnética de las tarjetas de crédito y las tarjetas de las máquinas de los bancos, así como muchos casetes de audio se fabrican utilizando partículas de $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ o de Fe_3O_4 . El ciclo cuadrado asegura que un bit de información, que se coloque en el material mediante un campo magnético, quede almacenado; es necesario un cambio abrupto y grande en la magnetización para eliminar la información del ferromán. Además, la magnetización producida por campos externos reducidos mantiene reducidos el campo coercitivo (H_c), la magnetización por saturación y la remanencia (B_r).

Los valores B_r y H_c correspondientes a algunos materiales magnéticos comunes para grabación, aparecen en la tabla 20-5.

Se han desarrollado muchas nuevas aleaciones con base en Co-Pt-Ta-Cr para la manufactura de discos duros para computadora, que se fabrican utilizando películas delgadas pulverizadas de otros materiales. Como ya se explicó en capítulos anteriores, se están perfec-

TABLA 20-5 ■ Propiedades de materiales comunes en forma de polvos para grabación magnética

	Longitud de partícula (μm)	Proporción dimensional	Magnetización B_r		Coercitividad H_c		Área superficial (m^2/g)	Temperatura de Curie $T_c(^{\circ}\text{C})$
			(Wb/m^2)	(uem/cm^3)	(kA/m)	(Oe)		
$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	0.20	5:1	0.44	350	22-34	420	15-30	600
$\text{Co-}\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	0.20	6:1	0.48	380	30-75	940	20-35	700
CrO_2	0.20	10:1	0.50	400	30-75	950	18-55	125
Fe	0.15	10:1	1.40 ^a	1100 ^a	56-176	2 200	20-60	770
Ferrita de bario	0.05	0.02 μm de grueso	0.40	320	56-240	3 000	20-25	350

^aPara partículas recubiertas estables, use sólo de 50 a 80% de estos valores, debido al menor volumen de partículas magnéticas.
(Fuente: The Complete Handbook of Magnetic Recording, Fourth Edition, por F. Jorgensen, p. 324, tabla 11-1. Copyright © 1996. The McGraw-Hill Companies. Reimpresa con autorización de McGraw-Hill Companies.)

cionando muchas aleaciones diferentes, como las basadas en Fe-Pt y Fe-Pd nanoestructurados, para aplicaciones de almacenamiento de datos. En tiempos recientes, ha evolucionado una tecnología conocida como *espintrónica* (*electrónica basada en el giro del electrón*). En esta tecnología, la idea principal es aprovechar el giro de los electrones como una nueva forma de afectar el flujo de corriente eléctrica (conocida como corriente polarizada por el giro) para la fabricación de dispositivos como son transistores de efecto de campo (TEC). También se está considerando la utilización del giro de los electrones (hacia arriba o hacia abajo) como una forma de almacenar información. Un ejemplo con mucho éxito de un dispositivo práctico, basado en la espintrónica, es un sensor gigante de magnetorresistencia (SGM) que se utiliza para leer información de discos duros en computadoras.

Imanes permanentes Por último, los materiales magnéticos se utilizan para la fabricación de imanes permanentes de gran potencia (tabla 20-6). Los imanes permanentes poderosos, que a veces se denominan imanes duros, requieren lo siguiente:

1. Alta remanencia (dominios estables).
2. Alta permeabilidad.
3. Alto campo coercitivo.
4. Ciclo de histéresis grande.
5. Alta potencia (o elevado producto BH).

El *récord* para cualquier producto de energía se obtiene para los imanes $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ con una potencia de $\sim 445 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ [~ 56 Mega-Gauss-Oersteds (MGOe)]. Estos imanes se construyen en forma de polvo mediante la rápida solidificación de una aleación fundida. Estos

TABLA 20-6 ■ Propiedades de materiales magnéticos seleccionados duros, o permanentes

Material	Nombre común	$\mu_0 M_r$ (T)	$\mu_0 H_c$ (T)	$(BH)_{\text{máx}}$ ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$)	T_c ($^{\circ}\text{C}$)
Fe-Co	Acero Co	1.07	0.02	6	887
Fe-Co-Al-Ni	Alnico-5	1.05	0.06	44	880
$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	Ferrita	0.42	0.31	34	469
SmCo_5	Sm-Co	0.87	0.80	144	723
$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	Nd-Fe-B	1.23	1.21	290-445	312

(Adaptada de Permanent Magnetism, por R. Skomski y J.M.D. Coey, p. 23, tabla 1-2. Editada por J.M.D. Coey y D.R. Tilley. Copyright © 1999 Institute of Physics Publishing. Adaptada con autorización.)

polvos se enlazan en una matriz polimérica o se comprimen en caliente para producir materiales voluminosos. El producto de la energía se incrementa cuando el imán sinterizado se "orienta" o se polariza. Algunos de los factores limitantes para el uso de estos materiales extraordinarios son la resistencia a la corrosión, la fragilidad y una temperatura de Curie relativamente baja, de $\sim 312^\circ\text{C}$.

La **potencia** del imán está relacionada con el tamaño del ciclo de histéresis, es decir, el producto máximo de B y H . La superficie del rectángulo de mayor tamaño que se puede inscribir en el segundo o en el cuarto cuadrante de la curva B - H se relaciona con la energía necesaria para desmagnetizar el imán [figuras 20-10a) y 20-10b)]. Para que el producto resulte grande, deberán ser grandes tanto la remanencia como el campo coercitivo.

En numerosas aplicaciones es necesario calcular el poder elevador de un imán permanente. La fuerza magnética obtenible utilizando un imán permanente está dada por

$$F = \frac{\mu_0 M^2 A}{2} \quad (20-11)$$

En esta ecuación, A es el área de sección transversal, M es la magnetización y μ_0 es la permeabilidad magnética del espacio libre.

Uno de los ejemplos de mayor éxito de las aportaciones hechas por científicos de materiales e ingenieros, en relación con este campo de actividad, es el perfeccionamiento de imanes permanentes poderosos de tierras raras. El avance alcanzado en el desarrollo de imanes permanentes poderosos se ilustra en la figura 20-10b). Los imanes permanentes se utilizan en un sinnúmero de aplicaciones, incluyendo altoparlantes, motores, generadores, imanes de sujeción, separación de minerales y cojinetes. En general, ofrecen un campo magnético no uniforme, pero es posible utilizar configuraciones geométricas conocidas como conjuntos de Halbach que llevan a campos magnéticos relativamente uniformes. El siguiente ejemplo ilustra aplicaciones de algunos de estos conceptos relacionados con materiales magnéticos permanentes.

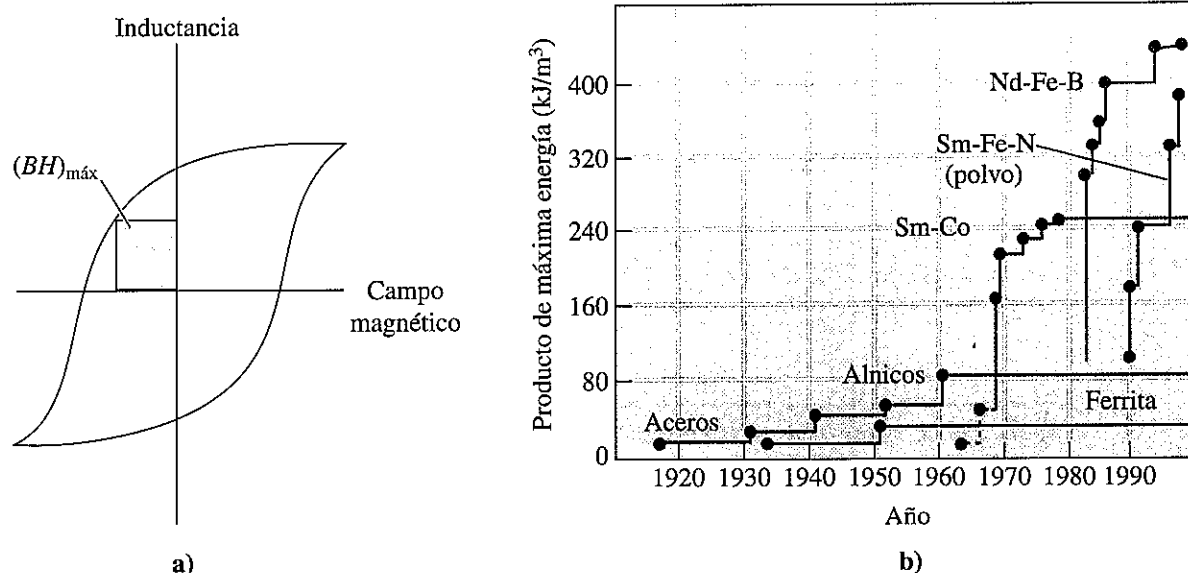
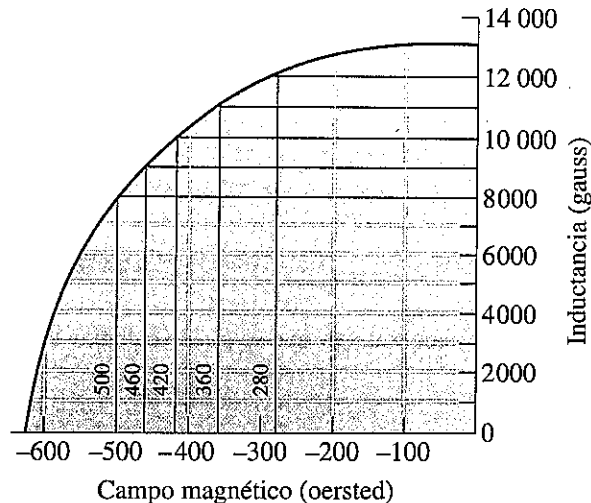


Figura 20-10 a) El rectángulo más grande trazado en el segundo o cuarto cuadrante de la curva B - H da el máximo producto BH . $(BH)_{\text{máx}}$ está relacionado con la potencia, o energía, necesaria para desmagnetizar el imán permanente. b) Desarrollo de materiales para imanes permanentes. El máximo producto de energía se muestra en el eje vertical. (Fuente: Adaptada de *Permanent Magnetism*, por R. Skomski y J.M.D. Coey, p. 25, fig. 1-15. Editado por J.M.D. Coey y D.R. Tilley. Copyright © 1999 Institute of Physics Publishing. Adaptada con autorización.)

Ejemplo 20-3**Producto de energía para imanes permanentes**

Determine la potencia, o producto BH , para el material magnético con las propiedades que se ilustran en la figura 20-11.

**Figura 20-11**

Cuarto cuadrante de la curva $B-H$ para un material magnético permanente (para el ejemplo 20-3).

SOLUCIÓN

Se han trazado varios rectángulos en el cuarto cuadrante de la curva $B-H$. El producto $B-H$ en cada uno es

$$BH_1 = (12\,000)(280) = 3.4 \times 10^6 \text{ gauss} \cdot \text{oersted}$$

$$BH_2 = (11\,000)(360) = 4.0 \times 10^6 \text{ gauss} \cdot \text{oersted}$$

$$BH_3 = (10\,000)(420) = 4.2 \times 10^6 \text{ gauss} \cdot \text{oersted} = \text{máximo}$$

$$BH_4 = (9\,000)(460) = 4.1 \times 10^6 \text{ gauss} \cdot \text{oersted}$$

$$BH_5 = (8\,000)(500) = 4.0 \times 10^6 \text{ gauss} \cdot \text{oersted}$$

Por tanto, la potencia es aproximadamente $4.2 \times 10^6 \text{ gauss} \cdot \text{oersted}$.

Ejemplo 20-4**Diseño y selección de materiales magnéticos**

Seleccione un material magnético apropiado para las siguientes aplicaciones: un motor eléctrico de alta eficiencia, un dispositivo magnético para mantener cerradas las puertas de alacenas, un imán utilizado en un amperímetro o en un voltímetro y en imágenes de resonancia magnética.

SOLUCIÓN

Motor eléctrico de alta eficiencia: Para reducir al mínimo las pérdidas por histéresis, se podría utilizar un hierro al silicio orientado, aprovechando su comportamiento anisótropo y su pequeño ciclo de histéresis. Como la aleación de hierro al silicio es conductora eléctricamente, se produciría una estructura laminada, con hojas delgadas de hierro al silicio empapadas en un material dieléctrico no conductor. Serían recomendables hojas de un espesor inferior a 0.5 mm.

Imán para puertas de alacenas: Los pestillos magnéticos que se utilizan para sujetar las puertas de alacenas deben ser imanes permanentes; sin embargo, un bajo costo es una característica de diseño más importante que una elevada potencia. Se recomendaría un acero ferrítico económico o una ferrita de bajo costo.

Imanes para un amperímetro o un voltímetro: Para estas aplicaciones, las aleaciones de Alnico son particularmente eficaces. Estas aleaciones son menos sensibles a cambios de temperatura, lo que asegura lecturas precisas de corriente o de voltaje dentro de una escala determinada de temperaturas.

Imágenes de resonancia magnética: Una de las aplicaciones para las IRM (Imágenes de Resonancia Magnética) es el diagnóstico médico. En este caso, se desea un imán muy poderoso. Un material magnético $\text{Nd}_2\text{Fe}_{12}\text{B}$, con un producto BH excepcionalmente alto, sería recomendable para esta aplicación. También es posible utilizar electroimanes muy poderosos utilizando superconductores.

El siguiente ejemplo ilustra la forma en que se puede calcular la potencia elevadora de un imán permanente:

Ejemplo 20-5 Potencia elevadora de un imán

Calcule la fuerza en kN para una superficie de un metro cuadrado de un imán permanente cuya magnetización de saturación es de 1.61 teslas.

SOLUCIÓN

Como se observó anteriormente, la fuerza de atracción de un imán permanente está dada por:

$$F = \frac{\mu_0 M^2 A}{2}$$

Se obtuvo el valor de $\mu_0 M = 1.61$ teslas. Se puede volver a presentar esta ecuación que proporciona la fuerza debida a la acción de un imán permanente como sigue:

$$F = \frac{\mu_0 M^2 A}{2} = \frac{(\mu_0 M)^2 A}{2\mu_0}$$

$$\therefore \frac{F}{A} = \frac{(1.61 \text{ T})^2}{2 \left(4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \right)} = 1031.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Nótese que en este caso la fuerza será de 1031 kN, dado que el área (A) quedó especificada igual a 1 m^2 .

20-8 Materiales magnéticos metálicos y cerámicos

En seguida se verán los materiales cerámicos y las aleaciones comunes que se utilizan en aplicaciones magnéticas y se analizará cómo se pueden mejorar sus propiedades y desempeño. Algunos materiales poliméricos han mostrado actividad magnética, pero sus temperaturas de transición Curie son demasiado bajas en comparación con las correspondientes de los materiales magnéticos metálicos y cerámicos.

Aleaciones magnéticas El hierro, el níquel y el cobalto puros no se utilizan normalmente en aplicaciones eléctricas, debido a sus conductividades eléctricas elevadas y a ciclos de histéresis relativamente grandes, lo que conduce a pérdidas de energía excesivas. Son imanes permanentes relativamente malos; los dominios son fáciles de reorientar y tanto la remanencia como el producto BH son reducidos, en comparación con los correspondientes a aleaciones más complejas. Se obtiene algún cambio en las propiedades magnéticas introduciendo defectos en la estructura. Las dislocaciones, los límites de grano, los límites entre fases múltiples y los defectos puntuales ayudan a fijar los límites de los dominios; de esta manera, los dominios se mantienen alineados cuando se elimina el campo magnetizador original.

Aleaciones de hierro-níquel. Algunas aleaciones de hierro níquel, como el Permalloy, tienen altas permeabilidades, lo que los hace útiles como imanes blandos. Un ejemplo de aplicación de estos imanes es la “cabeza” que graba o lee información en un disco de computadora (figura 20-12). Conforme el disco gira por debajo de la cabeza, una corriente produce un campo magnético en esta última. El campo magnético de la cabeza, a su vez, magnetiza una parte del disco. La dirección del campo producido en la cabeza determina la orientación de las partículas magnéticas incrustadas en el disco y, en consecuencia, se almacena información. Esta información puede recuperarse haciendo girar otra vez el disco por debajo de la cabeza. La región magnetizada en el disco induce una corriente en la cabeza; la dirección de la corriente depende de la dirección del campo magnético existente en el disco.

Hierro al silicio. Se procesa en aceros de grano orientado. La introducción de 3 a 5% de Si en el hierro produce una aleación que, después de un procesamiento apropiado, resulta útil en aplicaciones eléctricas, como motores y generadores. Se aprovecha el comportamiento magnético anisótropo del hierro al silicio para obtener el mejor desempeño. Como resultado de la laminación y del recocido subsiguientes, se forma una textura de hoja en la que las direcciones $\langle 100 \rangle$ de cada grano quedan alineadas. Dado que el hierro al silicio se magnetiza con mayor facilidad en las direcciones $\langle 100 \rangle$, el campo requerido para darle magnetización de

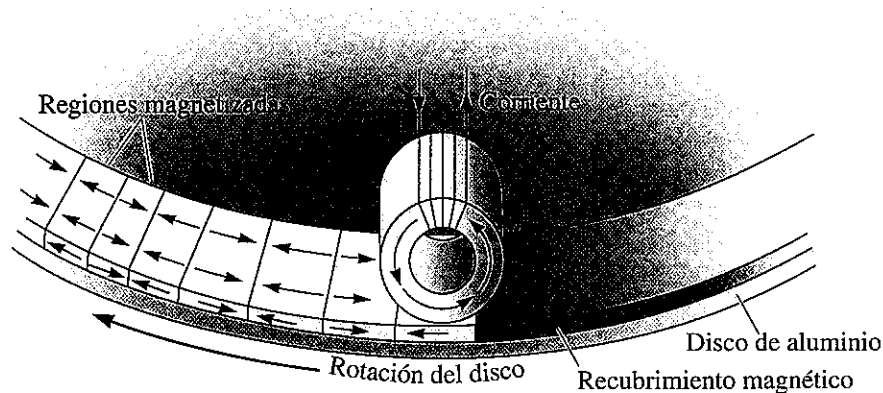
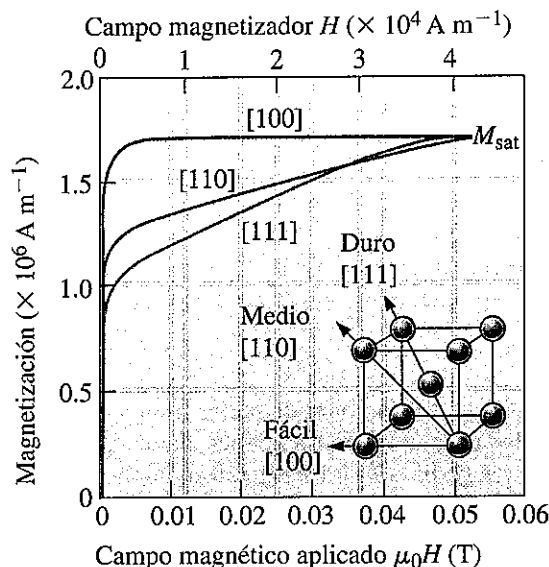


Figura 20-12 La información se puede almacenar o recuperar de un disco magnético con el uso de una cabeza electromagnética. En el almacenamiento, una corriente que pasa por la cabeza magnetiza dominios del disco; durante la recuperación, los dominios magnéticos del disco inducen una corriente eléctrica en la cabeza.

**Figura 20-13**

La curva de magnetización inicial para el hierro es altamente anisotrópica; la magnetización se facilita cuando las direcciones $\langle 100 \rangle$ están alineadas con el campo y se dificulta a lo largo de $[111]$. (Fuente: Principles of Electrical Engineering Materials and Devices, por S.O. Kasap, p. 623, fig. 8-24. Copyright © 1997 Irwin. Reproducida con permiso de McGraw-Hill Companies.)

saturación es muy pequeño, y se observan tanto un pequeño ciclo de histéresis como una reducida remanencia (figura 20-13). Este tipo de anisotropía se conoce como **anisotropía magnetocristalina**.

Imanes compuestos. Para reducir las pérdidas por corrientes parásitas, se utilizan imanes compuestos. Se laminan hojas delgadas de hierro al silicio intercalándolas con hojas de un material dieléctrico. Estas capas laminadas se ensamblan hasta obtener el espesor general deseado. El laminado aumenta la resistividad de los imanes compuestos y hace que éstos sean apropiados a frecuencias bajas e intermedias.

A frecuencias muy altas, las pérdidas tienen mayor importancia dado que los dominios no tienen campo para realinearse. En este caso, se puede utilizar un material compuesto que contenga partículas magnéticas en una matriz de polímero. Estas partículas, o dominios, giran fácilmente, al mismo tiempo que se reducen al mínimo las pérdidas por corrientes parásitas a causa de la alta resistividad del polímero.

Materiales para almacenamiento de información. Los materiales magnéticos para almacenamiento de información deben tener un ciclo cuadrado, así como un reducido campo coercitivo que permita una transmisión muy rápida de información. La cinta magnética para aplicaciones de audio o video se fabrica evaporando, pulverizando o depositando partículas de un material magnético como el $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ o bien el CrO_2 sobre una cinta de poliéster.

Los discos duros para almacenamiento de datos en computadoras se fabrican de una manera similar. En un disco duro, las partículas magnéticas están incrustadas en una película polimérica sobre un sustrato de aluminio plano. Debido a las características de la matriz polimérica y al pequeño tamaño de las partículas, los dominios pueden girar con rapidez en respuesta a un campo magnético. Estos materiales se resumen en la tabla 20-5.

Aleaciones metálicas complejas para imanes permanentes. Se fabrican imanes permanentes de calidad mejorada produciendo granos de un tamaño tan pequeño que sólo un dominio está presente en cada grano. Ahora los límites entre dominios son límites de grano en lugar de paredes de Bloch. Los dominios pueden cambiar su orientación con sólo girar, lo que requiere más energía que crecimiento del dominio. Se utilizan dos técnicas para la producción de estos materiales magnéticos: transformaciones de fase y metalurgia de polvos. El Alnico, una de las aleaciones metálicas complejas más comunes, tiene una estructura CCCu de una sola fase a

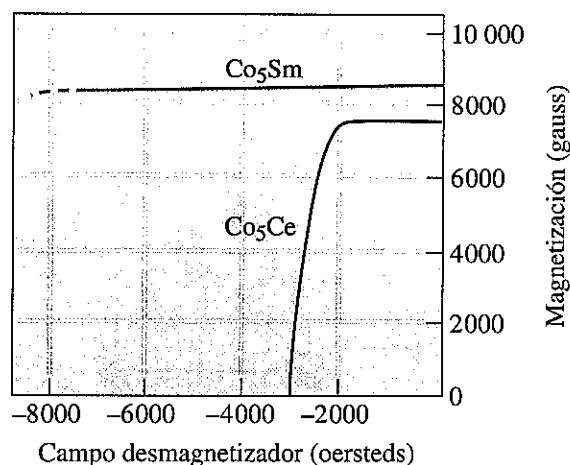


Figura 20-14

Curvas de desmagnetización para el Co_5Sm y Co_5Ce , que representan una parte del ciclo de histéresis.

temperaturas elevadas pero, cuando se deja enfriar lentamente por debajo de los 800 °C, se precipita una segunda fase CCCu rica en hierro y cobalto. Esta segunda fase es tan fina que cada partícula del precipitado es un dominio independiente, lo que produce remanencias, campos coercitivos y potencia muy altos. Con frecuencia, se permite que las aleaciones se enfrien y se transformen, estando sometidas a un campo magnético, a fin de alinear los dominios conforme se vayan formando.

Una segunda técnica, la metalurgia de los polvos, se utiliza para la fabricación de aleaciones de metales de tierras raras, incluyendo el cobalto-samario. Una composición que produce Co_5Sm , un compuesto intermetálico, tiene un producto BH elevado (figura 20-14) debido a giros magnéticos no apareados en los electrones $4f$ del samario. El material intermetálico frágil se tritura y se muele para producir un polvo fino en el que cada partícula es un dominio. El polvo se compacta a continuación, mientras está en un campo magnético impuesto, a fin de alinear los dominios en el polvo. Mediante una sinterización cuidadosa con el fin de evitar el crecimiento de las partículas, se obtiene un imán sólido de metalurgia de polvos. Otro imán de tierras raras basado en el neodimio, hierro y boro tiene un producto BH de 45 megagauss-oersted (MGOe). En estos materiales, los dominios provienen de un compuesto intermetálico de grano fino, el $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, en tanto que un precipitado fino de HfB_2 impide el movimiento de las paredes de los dominios.

Materiales cerámicos ferrimagnéticos Los materiales cerámicos magnéticos de uso común son las ferritas, que tienen una estructura cristalina en espinel (figura 20-15). Estas ferritas no tienen nada que ver con la *fase ferrítica* que se encuentra al estudiar el diagrama de fases Fe-C (capítulos 12 y 13). Las ferritas se utilizan en las comunicaciones inalámbricas y en la microelectrónica en aplicaciones como los inductores. Los polvos para ferritas se elaboran utilizando técnicas de procesamiento de materiales cerámicos.

Se puede entender el comportamiento de estos imanes cerámicos al observar la magnetita, Fe_3O_4 . La magnetita contiene dos iones de hierro diferentes, Fe^{2+} y Fe^{3+} , por lo que se podría reescribir la fórmula de la magnetita como $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_4^{2-}$. La estructura cristalina de la magnetita, o espinel, está basada en una configuración CCCa de iones de oxígeno, donde los iones de hierro ocupan sitios intersticiales seleccionados. Aun cuando la celda unitaria del espinel realmente contiene ocho de estas configuraciones CCCa, únicamente es necesario analizar una de las subceldas CCCa:

1. Hay cuatro iones de oxígeno en las posiciones CCCa de la subcelda.
2. En cada borde y en el centro de la subcelda están presentes sitios octaédricos, mismos que están rodeados por seis iones oxígeno. Un ion Fe^{2+} y un ion Fe^{3+} ocupan los sitios octaédricos.

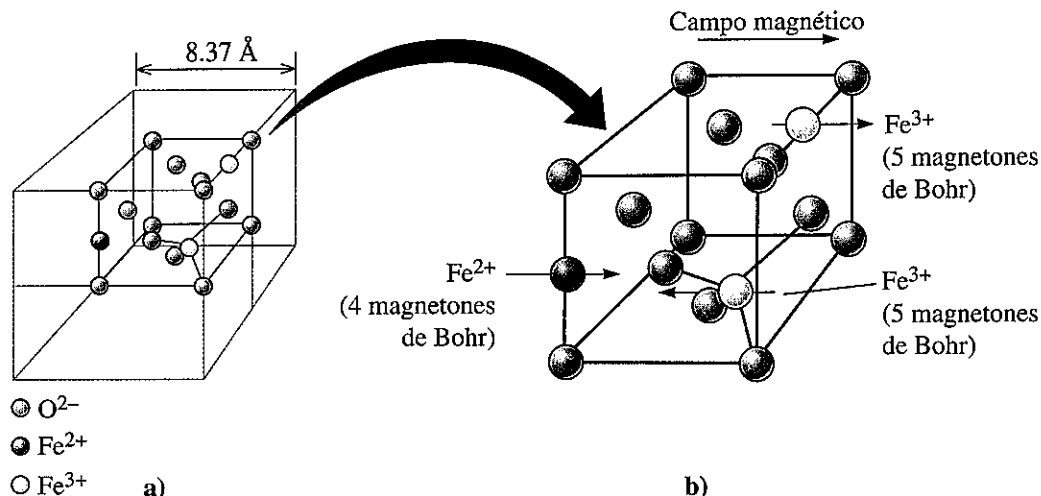


Figura 20-15 a) Estructura de la magnetita, Fe_3O_4 . b) Subcelda de la magnetita. Los momentos magnéticos de los iones en los sitios octaédricos quedan alineados con el campo magnético, pero los momentos de los iones en los sitios tetraédricos se oponen al campo. Esta configuración iónica produce un momento magnético neto.

3. Los sitios tetraédricos tienen índices en la subcelda, de la forma $(1/4, 1/4, 1/4)$. Un ion Fe^{3+} ocupa uno de los sitios tetraédricos.
4. Cuando se forman los iones Fe^{2+} , se eliminan los dos electrones $4s$ del hierro, pero todos los electrones $3d$ se quedan. Debido a que existen cuatro electrones no apareados en el nivel $3d$ del hierro, la fuerza magnética del dipolo Fe^{2+} es cuatro de magnetones de Bohr. Cuando se forma Fe^{3+} , los dos electrones $4s$ y uno de los electrones $3d$ son retirados. El ion Fe^{3+} tiene cinco electrones no apareados en el nivel $3d$ y, por tanto, tiene una fuerza de cinco magnetones de Bohr.
5. Los iones en los sitios tetraédricos de la magnetita quedan alineados de forma que sus momentos magnéticos se oponen al campo magnético aplicado, pero los iones de los sitios octaédricos refuerzan el campo [figura 20-15b)]. En consecuencia, el ion Fe^{3+} de un sitio tetraédrico neutraliza al ion Fe^{3+} del sitio octaédrico (el acoplamiento del ion Fe^{3+} es antiferromagnético), pero el ion Fe^{2+} del sitio octaédrico no encuentra oposición de ningún otro ion, lo que refuerza el campo magnético. El siguiente ejemplo muestra la forma de calcular la magnetización en el Fe_3O_4 , que es una de las ferritas.

Ejemplo 20-6

Magnetización en la magnetita (Fe_3O_4)

Calcule el momento magnético total por centímetro cúbico en la magnetita. Calcule el valor de la densidad de flujo de saturación (B_{sat}) para este material.

SOLUCIÓN

En la subcelda [figura 20-15b)], el momento magnético total es igual a cuatro magnetones de Bohr, obtenido a partir del ion Fe^{2+} , en vista de que se cancelan entre sí los momentos magnéticos de los dos iones Fe^{3+} localizados en los sitios tetraédricos y octaédricos.

En toda la celda unitaria existen ocho subceldas, por lo que el momento magnético total es igual a 32 magnetones de Bohr por celda.

El tamaño de la celda unitaria, con un parámetro de red igual a 8.37×10^{-8} cm, es:

$$V_{\text{celda}} = (8.37 \times 10^{-8})^3 = 5.86 \times 10^{-22} \text{ cm}^3$$

El momento magnético por centímetro cúbico es igual a:

$$\begin{aligned} \text{Momento total} &= \frac{32 \text{ magnetones de Bohr/celda}}{5.86 \times 10^{-22} \text{ cm}^3/\text{celda}} = 5.46 \times 10^{22} \text{ magnetones/cm}^3 \\ &= (5.46 \times 10^{22})(9.274 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{magnetón}) \\ &= 0.51 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{cm}^3 = 5.1 \times 10^5 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{m}^3 = 5.1 \times 10^5 \text{ A/m} \end{aligned}$$

Esta expresión representa la magnetización M a la saturación (M_{sat}). El valor de $B_{\text{sat}} \approx \mu_0 M_{\text{sat}}$ será $= (4\pi \times 10^{-7})(5.1 \times 10^5) = 0.64$ teslas.

Cuando se reemplazan iones con iones Fe^{2+} en la estructura de espinel, es posible cambiar el comportamiento magnético. Iones que pueden no producir ferromagnetismo en un metal puro pueden contribuir al ferrimagnetismo en los espines, como se observa en los momentos magnéticos de la tabla 20-7. Cuando el ion Fe^{2+} es reemplazado con mezclas diversas de manganeso, zinc, níquel y cobre, se obtienen imanes eléctricos blandos. Los iones de níquel y de manganeso tienen momentos magnéticos que cancelan parcialmente el efecto de los dos iones de hierro, pero se obtiene un comportamiento neto ferrimagnético, con un ciclo de histéresis pequeño. La elevada resistividad eléctrica de estos compuestos cerámicos ayuda a reducir al mínimo las corrientes parásitas, permitiendo la operación de estos materiales a altas frecuencias. Las ferritas utilizadas en aplicaciones de cómputo pueden contener adiciones de manganeso, magnesio o cobalto para producir un comportamiento cuadrado en el ciclo de histéresis.

Otro grupo de imanes cerámicos suaves se basa en los granates, incluyendo el granate de itrio hierro, $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG). Estos óxidos complejos, que se pueden modificar al sustituir el hierro con aluminio o cromo, o al reemplazar el itrio con lantano o praseodimio, se comportan de manera muy semejante a las ferritas. Otro granate, basado en el gadolinio y el galio, puede producirse en forma de película delgada. Se pueden producir minúsculos dominios magnéticos en esta película de granate; estos dominios, o *burbujas magnéticas*, pueden servir como unidades de almacenamiento para computadoras. Una vez magnetizados, los dominios no pierden su memoria en caso de una pérdida repentina de energía.

Los imanes cerámicos duros que se utilizan como imanes permanentes incluyen otra familia de óxidos complejos, las ferritas hexagonales. Entre éstas se encuentran el $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ y el $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$.

El ejemplo que sigue muestra la selección de un imán cerámico.

TABLA 20-7 ■ Momentos magnéticos de iones en la estructura de espinel

Ion	Magnetones de Bohr	Ion	Magnetones de Bohr
Fe^{3+}	5	Co^{2+}	3
Mn^{2+}	5	Ni^{2+}	2
Fe^{2+}	4	Cu^{2+}	1
		Zn^{2+}	0

Ejemplo 20-7**Diseño y selección de materiales para un imán cerámico**

Diseñe un imán cúbico de ferrita que tenga un momento magnético total por metro cúbico de 5.5×10^5 A/m.

SOLUCIÓN

En el ejemplo 20-6 se vio que el momento magnético por metro cúbico para el Fe_3O_4 es igual a 5.1×10^5 A/m. Si se desea obtener una magnetización de saturación más elevada, se deben reemplazar los iones Fe^{2+} con iones que tengan más magnetones de Bohr por átomo. Una de las posibilidades es el Mn^{2+} (tabla 20-7), que tiene cinco magnetones de Bohr.

Suponiendo que la adición de dos iones Mn no afecta de manera apreciable el tamaño de la celda unitaria, se encuentra, del ejemplo 20-6, que:

$$V_{\text{celda}} = 5.86 \times 10^{-22} \text{ cm}^3 = 5.86 \times 10^{-28} \text{ m}^3$$

Sea x la fracción de iones Mn^{2+} que han reemplazado a los iones Fe^{2+} , que ahora se han reducido a $1 - x$. Entonces, el momento magnético total es:

Momento total

$$\begin{aligned} &= \frac{(8 \text{ subceldas})[(x)(5 \text{ magnetones}) + (1 - x)(4 \text{ magnetones})](9.274 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2)}{5.86 \times 10^{-28} \text{ m}^3} \\ &= \frac{(8)(5x + 4 - 4x)(9.274 \times 10^{-24})}{5.86 \times 10^{-28}} = 5.5 \times 10^5 \end{aligned}$$

$$x = 0.344$$

Por tanto, es necesario sustituir 34.4 en % de átomos de los iones Fe^{2+} con iones Mn^{2+} para obtener la magnetización deseada.

Magnetoestricción Ciertos materiales se pueden deformar cuando cambia su estado magnético. Este efecto se utiliza en los activadores. El efecto magnetorrestrictivo se puede observar modificando el campo magnético o modificando la temperatura. El hierro, níquel, Fe_3O_4 , TbFe_2 , DyFe y SmFe_2 son ejemplos de algunos materiales que muestran este efecto. El Terfenol-D, que recibe su nombre en función de sus elementos constitutivos: el terbio (Tb), el hierro (Fe) y el disprosio (Dy) así como de su inventor el Naval Ordnance Laboratory (NOL), es uno de los materiales magnetoestrictivos más conocidos cuya composición es $\sim \text{Tb}_x\text{Dy}_{1-x}\text{Fe}_y$ ($0.27 < x < 0.30$, $1.9 < y < 2$). Este fenómeno de magnetoestricción es análogo a la electrorrestricción. En fechas recientes, se han perfeccionado algunas aleaciones ferromagnéticas que también muestran magnetoestricción.

Resumen

- Todos los materiales interactúan con los campos magnéticos. Las propiedades magnéticas de los materiales están relacionadas con la interacción de los dipolos magnéticos y un campo magnético. Los dipolos magnéticos se originan con la estructura electrónica del átomo, generando varios tipos de comportamientos.
- Los materiales magnéticos han hecho posible la aparición de numerosas tecnologías, desde imanes superconductores de alta intensidad para imágenes de resonancia magnética, materiales semiduros que se utilizan en el almacenamiento de datos; imanes permanentes

utilizados en altoparlantes, motores y generadores, hasta materiales superparamagnéticos que se utilizan para elaborar ferrofluidos y la separación magnética de moléculas y celdas del ADN.

- En los materiales diamagnéticos, los dipolos magnéticos se oponen al campo magnético aplicado.
- En los materiales paramagnéticos, los dipolos magnéticos refuerzan ligeramente el campo magnético aplicado, incrementando la magnetización o la inductancia netas.
- Los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos son no lineales desde el punto de vista magnético; su permeabilidad depende de manera importante del campo magnético aplicado. En materiales ferromagnéticos (como hierro, níquel y cobalto), los dipolos magnéticos refuerzan poderosamente el campo magnético aplicado, produciendo una magnetización o una inductancia neta importantes. En materiales ferrimagnéticos, algunos dipolos magnéticos refuerzan el campo, en tanto que otros se oponen, pero ocurre un incremento neto en la magnetización o en la inductancia. La magnetización puede conservarse incluso después de eliminar el campo magnético. Si la temperatura se incrementa por encima de la de Curie, desaparece el comportamiento ferromagnético o ferrimagnético.
- La estructura de los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos contiene dominios dentro de los cuales todos los dipolos magnéticos están alineados. Cuando se aplica un campo magnético, los dipolos quedan alineados con el campo, incrementando al máximo su valor de magnetización o de saturación. Al eliminar el campo magnético, es posible que permanezca parte del alineamiento en los dominios, generando una magnetización remanente.
- En el caso de los materiales magnéticos blandos, existe remanencia y sólo se requiere de un campo coercitivo pequeño para eliminar cualquier alineación existente en los dominios y, por lo mismo, poca energía consumida en la reorientación de los dominios cuando se aplica un campo magnético alternante.
- En el caso de los materiales magnéticos duros, es decir permanentes, los dominios se conservan casi por completo alineados al eliminar el campo magnético, se requieren importantes campos coercitivos para orientar de manera aleatoria los dominios y se observa un ciclo de histéresis grande. Este estado le da al imán una alta potencia.
- La magnetorrestricción es el desarrollo de una deformación en respuesta al cambio del campo magnético aplicado o a un cambio en la temperatura que induzca una transformación magnética. Se han desarrollado materiales magnetostrictivos del tipo Terfenol para aplicaciones en activadores.

Glosario

Anisotropía de forma Dependencia de la coercitividad sobre la forma de las partículas magnéticas.

Anisotropía magnetocristalina En monocristales, la coercitividad depende de la dirección cristalográfica, creando ejes fáciles y ejes difíciles de magnetización.

Antiferromagnetismo Distribución de los momentos magnéticos de modo que se cancelan los momentos magnéticos de los átomos o de los iones, generando una magnetización neta igual a cero.

Ciclo de histéresis Ciclo que traza la magnetización en un material ferromagnético o ferrimagnético cuando el campo magnético es alternado.

Coercitividad Campo magnético necesario para forzar los dominios en una dirección opuesta a la orientación de la magnetización. Ésta es una propiedad sensible a la microestructura.

Diamagnetismo Efecto causado por el momento magnético debido al giro de los electrones en sus órbitas, el cual produce una ligera oposición al campo magnético impuesto.

Dominios Pequeñas regiones dentro de un material de monocristalino o policristalino, en las que todas las direcciones de magnetización están alineadas.

Ferrimagnetismo Comportamiento magnético que resulta cuando los iones de un material tienen sus momentos magnéticos alineados, en una distribución antiparalela tal, que los momentos no se cancelan del todo entre sí, quedando una magnetización neta.

Ferromagnetismo Alineación de los momentos magnéticos de los átomos en la misma dirección de modo que, después de eliminar el campo impuesto, queda una pequeña magnetización neta.

Imán blando Material ferromagnético o ferrimagnético que tiene una coercitividad de $\leq 10^3 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$.

Imán duro Material ferromagnético o ferrimagnético que tiene una coercitividad $> 10^4 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$. Es lo mismo que un imán permanente.

Imán permanente Material magnético duro.

Magnetización El momento magnético total por unidad de volumen.

Magnetización de saturación Cuando todos los dipolos se han alineado con el campo, produciendo magnetización máxima.

Magnetón de Bohr Intensidad del momento magnético de un electrón (μ_B) debida al giro de ese electrón.

Momento magnético Intensidad del campo magnético asociada con un dipolo magnético.

Paramagnetismo Momento magnético neto causado por el alineamiento de los espines de los electrones al aplicar un campo magnético.

Paredes de Bloch Límites entre dominios magnéticos.

Permeabilidad magnética Relación entre la inductancia o magnetización y el campo magnético. Es una medida de la facilidad con la que las líneas de flujo magnético “pasan” por un material.

Potencia Intensidad de un imán permanente expresada por el producto máximo de la inductancia y el campo magnético.

Remanencia Polarización o magnetización que queda en un material después de que se haya retirado un campo magnético. La remanencia se debe al alineamiento permanente de los dipolos.

Superparamagnetismo En el régimen a nanoescala, materiales que son ferromagnéticos o ferrimagnéticos pero que se comportan de forma paramagnética (debido a sus granos o partículas de nanotamaño).

Susceptibilidad magnética Relación entre la magnetización y el campo aplicado.

Temperatura de Curie Temperatura (T_C) por arriba de la cual los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos se convierten en paramagnéticos.

Problemas

Sección 20-1 Clasificación de los materiales magnéticos

Sección 20-2 Dipolos magnéticos y momentos magnéticos

- 20-1** Cite cuatro aplicaciones de distintos materiales magnéticos.
- 20-2** Explique el siguiente enunciado “Estrictamente hablando, no existe ningún material no magnético”.
- 20-3** Normalmente no se presta atención al momento magnético del núcleo. ¿En qué aplicaciones se hace importante este momento magnético?

20-4 ¿Cuáles dos movimientos de los electrones son importantes para determinar las propiedades magnéticas de los materiales?

20-5 Explique por qué sólo un pequeño grupo de sólidos presenta un comportamiento ferromagnético o ferrimagnético.

20-6 Calcule y compare la magnetización máxima que se debe esperar del hierro, el níquel, el cobalto y el gadolinio. Hay siete electrones en el nivel 4f del gadolinio. Compare los valores calculados con los observados experimentalmente.

Sección 20-3 Magnetización, permeabilidad y el campo magnético

Sección 20-4 Materiales diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, ferrimagnéticos y superparamagnéticos

Sección 20-5 Estructura del dominio y el ciclo de histéresis

- 20-7** Defina los siguientes términos: inducción magnética, campo magnético, susceptibilidad magnética y permeabilidad magnética.
- 20-8** Defina los siguientes términos: materiales ferromagnéticos, ferrimagnéticos, diamagnéticos, paramagnéticos, superparamagnéticos y antiferromagnéticos.
- 20-9** ¿Qué es un material ferromagnético? ¿Qué es un material ferrimagnético? Explique y dé ejemplos de cada tipo de material.
- 20-10** ¿Cómo cambia la permeabilidad de los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos con la temperatura cuando ésta es superior a la temperatura de Curie?
- 20-11** Deduzca la ecuación $\mu_r = 1 + \chi_m$ usando las ecuaciones de la 20-4 a la 20-7.
- 20-12** Una bobina solenoide de permalloy 4-79 necesita producir una inductancia mínima de 1.5 Wb/m^2 . Si la máxima corriente permitida es de 5 mA, ¿cuántas vueltas son necesarias en un alambre de 1 m de largo?
- 20-13** Se ha de producir una aleación de níquel y cobalto para obtener una magnetización de $2 \times 10^6 \text{ A/m}$. La estructura del cristal de la aleación es CCCa con un parámetro de red de 0.3544 nm. Determine el porcentaje atómico de cobalto que se hace necesario, suponiendo que no ocurre interacción alguna entre el níquel y el cobalto.
- 20-14** Estime la magnetización que se produciría en una aleación que contiene níquel y 70% de átomos de cobre, suponiendo que no ocurre interacción alguna.
- 20-15** Una aleación de Fe-80% Ni tiene una permeabilidad máxima de 300 000 cuando se obtiene una inductancia de 3500 gauss. La aleación se coloca en una bobina de 20 vueltas, de 2 cm de longitud. ¿Qué corriente debe fluir por los conductores de la bobina para obtener este campo?
- 20-16** Una aleación de Fe-49% Ni tiene una permeabilidad máxima de 64 000 cuando se le aplica un campo magnético de 0.125 oersteds. ¿Qué inductancia se obtiene y qué corriente

se necesita para llegar a esta inductancia en una bobina de 200 espiras y 3 cm de longitud?

- 20-17** Trace un esquema de los ciclos $B-H$ y $M-H$ para un material ferromagnético común. ¿Cuál es la diferencia entre estos dos ciclos?
- 20-18** ¿Es constante la permeabilidad magnética de un material ferromagnético o ferrimagnético? Explique.
- 20-19** Desde un punto de vista fenomenológico, ¿cuáles son las similitudes entre los elastómeros, los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos y los ferroeléctricos?
- 20-20** ¿Cuáles son las diferencias principales entre los materiales ferromagnéticos y los ferrimagnéticos?
- 20-21** Compare las resistividades eléctricas de los metales ferromagnéticos y los cerámicos ferrimagnéticos.
- 20-22** ¿Por qué son importantes las pérdidas por corrientes parásitas, en el diseño de los materiales ferromagnéticos, pero son menos importantes en los materiales ferrimagnéticos?
- 20-23** ¿Qué elemento tiene la magnetización de saturación más elevada? ¿Cuáles son las aleaciones con la más alta magnetización de saturación de entre todos los materiales?
- 20-24** ¿Qué material, entre todos los materiales magnéticos, tiene el producto de energía o potencia más elevado?
- 20-25** ¿La coercitividad de un material es una propiedad sensible a la microestructura? ¿Es la remanencia una propiedad sensible a la microestructura? Explique.
- 20-26** ¿La magnetización de saturación es una propiedad sensible a la microestructura? Explique.
- 20-27** ¿Puede un mismo material tener diferentes ciclos de histéresis? Explique.
- 20-28** Los siguientes datos describen el efecto del campo magnético en la inductancia de un acero al silicio. Calcule la permeabilidad inicial y la máxima del material.

$H \text{ (A/m)}$	$B \text{ (tesla)}$
0.00	0
20	0.08
40	0.30
60	0.65
80	0.85
100	0.95
150	1.10
250	1.25

20-29 Un material magnético tiene un campo coercitivo de 167 A/m, una magnetización de saturación de 0.616 teslas y una inductancia residual de 0.3 teslas. Trace el ciclo de histéresis del material.

20-30 Un material magnético tiene un campo coercitivo de 10.74 A/m, una magnetización de saturación de 2.158 teslas y una inductancia residual de 1.183 teslas. Trace el ciclo de histéresis del material.

20-31 Usando la figura 20-16, determine las propiedades siguientes del material magnético: remanencia, magnetización de saturación, campo coercitivo, permeabilidad inicial, permeabilidad máxima y potencia (producto BH máximo).

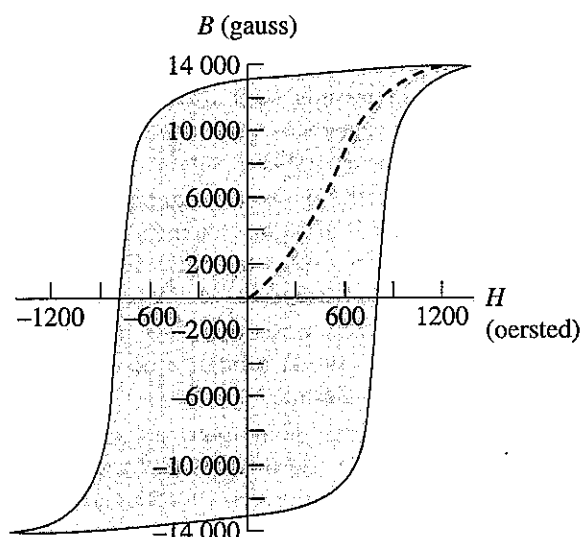


Figura 20-16 Curva de histéresis de un material magnético duro (para el problema 20-31).

20-32 Utilizando la figura 20-17, determine las siguientes propiedades del material magnético: remanencia, magnetización de saturación, campo coercitivo, permeabilidad inicial,

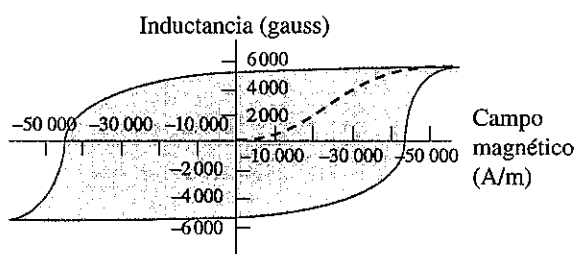


Figura 20-17 Curva de histéresis de un material magnético duro (para el problema 20-32).

permeabilidad máxima y potencia (producto BH máximo).

Sección 20-6 La temperatura de Curie

Sección 20-7 Aplicaciones de los materiales magnéticos

Sección 20-8 Materiales magnéticos metálicos y cerámicos

20-33 Trace el ciclo $M-H$ para el Fe a 300, 500 y 1000 K.

20-34 Defina los términos de materiales magnéticos blandos y duros. Trace un ciclo $M-H$ común para cada material.

20-35 ¿Qué características de importancia están asociadas con los materiales magnéticos blandos?

20-36 Los materiales que se usan para el almacenamiento magnético de datos son magnéticamente duros o blandos? Explique.

20-37 Dé ejemplos de materiales que se utilizan en la grabación magnética.

20-38 ¿Cuáles son las ventajas de utilizar imanes Fe-Nd-B? ¿Cuáles son algunas de sus desventajas?

20-39 Estime la potencia del material Co_5Ce de la figura 20-14.

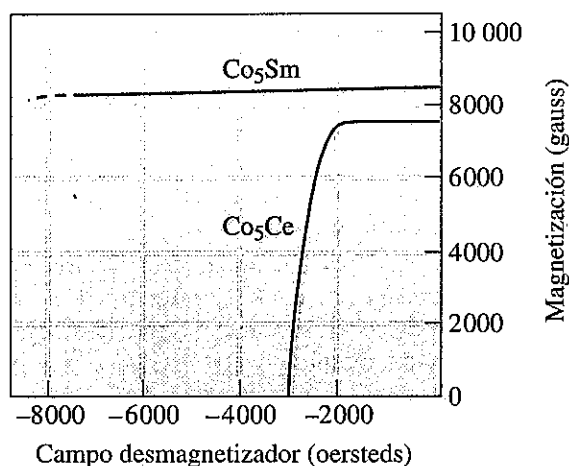


Figura 20-14 (Repetida para el problema 20-39.) Curvas de desmagnetización para Co_5Sm y Co_5Ce , que representan parte del ciclo de histéresis.

20-40 ¿Qué ventajas tiene el material Fe-3% Si en comparación con el permalloy para utilizarse en motores eléctricos?

- 20-41** El campo coercitivo del hierro puro está relacionado con el tamaño del grano mediante la relación $H_c = 1.83 + 4.14/\sqrt{A}$, donde A es el área del grano en dos dimensiones (mm^2) y H_c aparece en A/m. Si sólo el tamaño del grano influye al 99.95% de hierro (coercitividad de 0.9 oersted), calcule el tamaño de los granos del material. ¿Qué le ocurre al valor de la coercitividad cuando el hierro se recuece para hacer crecer el grano?
- 20-42** Calcule la fuerza de atracción por metro cuadrado de un imán permanente cuya magnetización de saturación es igual a 1.0 tesla.
- 20-43** Suponga que se sustituye 10% de los iones Fe^{2+} de la magnetita con iones Cu^{2+} . Determine el momento magnético total por centímetro cúbico.
- 20-44** Suponga que el momento magnético total por metro cúbico en una estructura de espinel, en la que iones de Ni^{2+} han reemplazado a una parte de los iones de Fe^{2+} , es de 4.6×10^5 A/m. Calcule la fracción de iones de Fe^{2+} que han sido sustituidos y el porcentaje en peso del Ni presente en el espinel.
- 20-45** ¿Qué es magnetoestricción? ¿En qué se parece a la electroestricción? ¿Cuál es la diferencia con un efecto piezoeléctrico?
- 20-46** Dé varios ejemplos de materiales que presenten el efecto de magnetoestricción.
- 20-47** ¿Qué es la espintrónica? Dé un ejemplo de un dispositivo basado en la espintrónica que se utiliza en computadoras personales y en las portátiles.



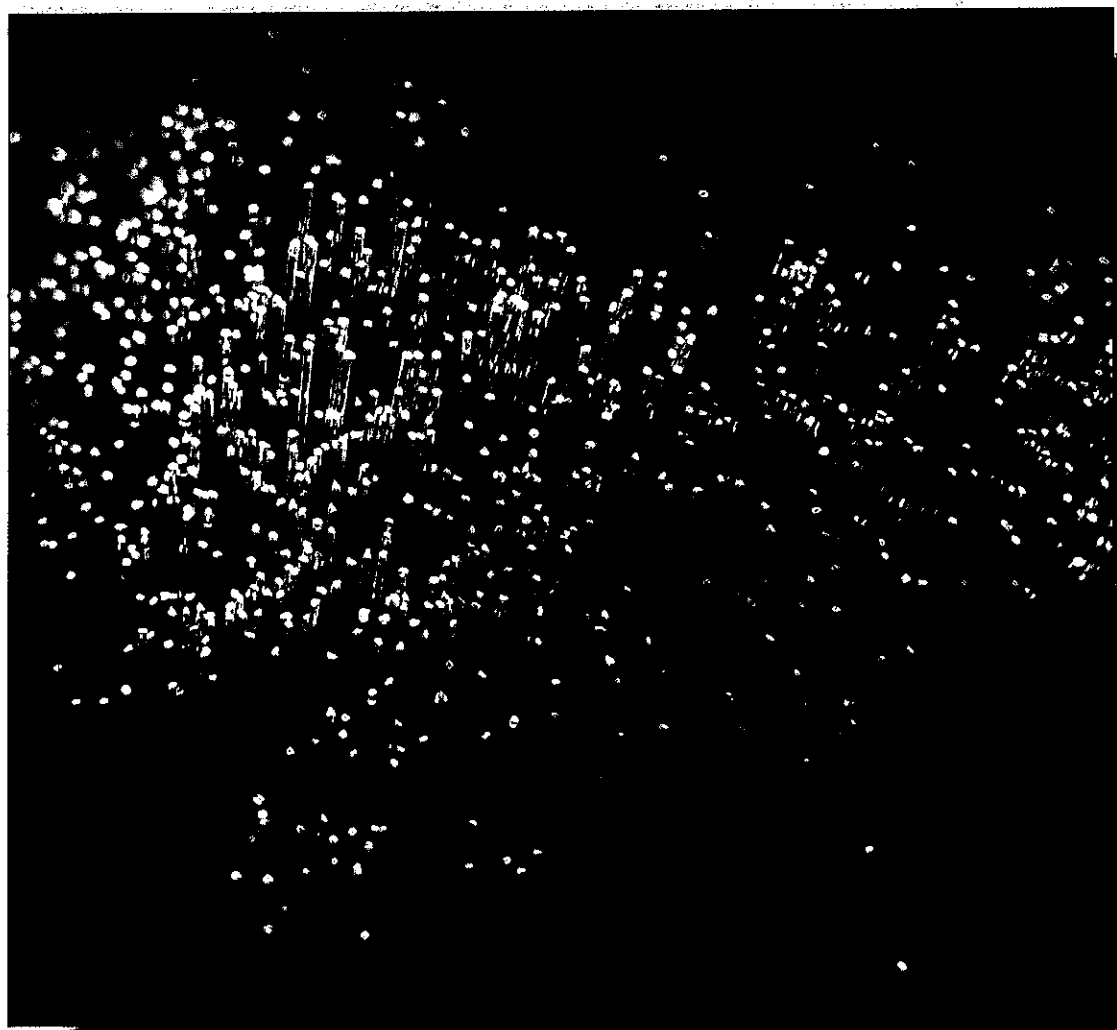
Problemas de diseño

- 20-48** Diseñe un solenoide de una longitud no mayor a 1 cm que produzca una inductancia de 3 000 gauss.
- 20-49** Diseñe un imán permanente que tenga una remanencia de por lo menos 5 000 gauss, que no pueda ser desmagnetizado si se expone a una temperatura de 400 °C o a un campo magnético de 1000 oersteds, además de tener una buena potencia magnética.
- 20-50** Diseñe una ferrita de estructura en espinel que produzca un momento magnético total por metro cúbico de 5.6×10^5 A/m.
- 20-51** Diseñe una ferrita de estructura de espinel que produzca un momento magnético total de 4.1×10^5 A/m por metro cúbico.
- 20-52** Diseñe un imán permanente para levantar una carga máxima de 1000 kg, bajo temperaturas de operación de hasta 750 °C. ¿Qué material(es) de entre los citados en la tabla 20-6 satisface(n) el requisito aquí mencionado?



Problemas de cómputo

- 20-53** *Conversión de unidades magnéticas.* Escriba un programa de cómputo que convierta unidades magnéticas del sistema cgs, es decir, de Gauss, al sistema SI. Por ejemplo, si el usuario da un valor de la densidad de flujo en Gauss, el programa deberá dar el valor correspondiente en Wb/m^2 o en teslas.



© Dvmsimages | Dreamstime.com

Los materiales ópticos desempeñan una función de importancia decisiva en la infraestructura de los sistemas de comunicación y de tecnología de información. Hay millones de kilómetros de fibras ópticas, como las que se ven en la fotografía, instalados en todo el mundo. Las fibras ópticas para comunicaciones y en servicios de salud, rayos láser para aplicaciones en medicina y manufacturas, grupos de espejos micro-maquinados, diodos emisores de luz y celdas solares han hecho posible una amplia variedad de nuevas tecnologías.

Materiales fotónicos

¿Se ha preguntado alguna vez?

- ¿Por qué el cielo se ve azul?
- ¿Cómo funciona una fibra óptica?
- ¿Qué factores controlan la transmisión y absorción de luz en diferentes materiales?
- ¿Qué significan las siglas LASER?
- ¿De qué está hecho un láser de rubí?
- ¿Si la operación de una lámpara fluorescente incluye el fenómeno de fosforescencia?
- ¿En qué forma la invención de rayos láser azules hizo posible los discos DVD de alta definición?

Los materiales fotónicos u ópticos han causado un impacto significativo en el desarrollo de la infraestructura de las comunicaciones y de tecnología de la información. Los materiales fotónicos también han desempeñado un papel clave en muchas otras tecnologías relacionadas con la medicina, la fabricación y la astronomía, por mencionar algunas. Hasta ahora, se han instalado millones de miles de fibras ópticas en todo el mundo. El término "optoelectrónica" se refiere a la ciencia y tecnología que combina materiales electrónicos y ópticos. Entre éstos, se deben mencionar los diodos emisores de luz (LED), las celdas solares y los láseres semiconductores. Desde simples espejos, prismas y lentes hasta los últimos materiales fotónicos de brecha de banda, el campo de los materiales y dispositivos ópticos se ha desarrollado con gran rapidez. El objetivo de este capítulo es presentar un resumen de los principios fundamentales que han servido de guía en las aplicaciones de materiales ópticos.

Las propiedades ópticas de los materiales están relacionadas con la interacción entre el material y las radiaciones electromagnéticas, en forma de ondas o de partículas de energía conocidas como fotones. Esta radiación puede tener características que se ubiquen en el espectro de la luz visible o pueden resultar invisibles para el ojo humano. En este capítulo, se explorarán dos vertientes mediante las cuales es posible utilizar las propiedades ópticas de los materiales: emisiones de fotones de los materiales e interacciones de fotones con los materiales.

21-1 El espectro electromagnético

La luz es energía, o radiación, en forma de ondas o partículas llamadas **fotones** que pueden ser emitidos de un material. Las características de importancia de los fotones, su energía E , longitud de onda λ y frecuencia ν , se relacionan entre sí con la ecuación

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (21-1)$$

donde c es la rapidez de la luz (en el vacío, la rapidez c_0 es 3×10^{10} cm/s) y h es la constante de Planck (6.626×10^{-34} J · s). En vista de que por electrón volt (eV) existen 1.6×10^{-19} J, el valor de h también está dado por 4.14×10^{-15} eV · s. Esta ecuación permite pensar en el fotón ya sea como una partícula de energía E o como una onda con una longitud de onda y una frecuencia características.

El espectro de la radiación eléctrica aparece en la figura 21-1. Los rayos gamma y los rayos X tienen una longitud de onda muy corta, es decir una alta frecuencia, y poseen energías muy elevadas; las microondas y las ondas de radio poseen energías muy reducidas y la luz visible representa sólo una parte muy angosta del espectro electromagnético. La figura 21-1 ilustra la respuesta del ojo humano a diferentes colores. También se muestran las brechas de banda (E_g) de semiconductores (en eV) y las longitudes de onda correspondientes de la luz. Como se analizó en el capítulo 19, estas relaciones se utilizan para fabricar los LED de diferentes colores.

21-2 Refracción, reflexión, absorción y transmisión

Todos los materiales interactúan de alguna manera con la luz. Los fotones son los causantes de varios fenómenos ópticos cuando interactúan con la estructura electrónica o cristalina de un material (figura 21-2). Si los fotones que inciden sobre un material interactúan con los electrones de valencia, pueden ocurrir varias cosas. Los fotones pueden ceder su energía al material, en cuyo caso hay una *absorción*, o bien, los fotones ceden su energía pero de inmediato el material emite fotones de energía idéntica; en este caso, lo que ocurre es una *reflexión*. Por último, los fotones pueden no interactuar con la estructura electrónica del material; entonces, lo que ocurre es una *transmisión*. No obstante, incluso en la transmisión, los fotones cambian de velocidad y se presenta la *refracción*. Es posible que una pequeña parte de la intensidad de la luz incidente se disperse con una frecuencia ligeramente distinta (dispersión de Raman).

Como se observa en la figura 21-2, un rayo incidente de intensidad I_0 puede ser reflejado, absorbido y transmitido parcialmente. La intensidad del haz incidente I_0 se puede expresar, por tanto, como

$$I_0 = I_r + I_a + I_t \quad (21-2)$$

donde I_r es la parte reflejada del haz, I_a es la parte absorbida e I_t es la que finalmente se transmite a través del material. La reflexión puede ocurrir tanto en la superficie delantera como en la trasera del material. La figura 21-2a) muestra reflexión únicamente en la superficie delantera. También ocurren reflexiones a ciertos ángulos con respecto a la normal de la superficie (reflexión especular) y también en muchas otras direcciones [reflexión difusa, no mostrada en la figura 21-2a)]. Para determinar el comportamiento del fotón, son importantes varios factores; de particular importancia es la energía requerida para excitar un electrón y pasarlo a un estado más elevado de energía.

En seguida se examina cada uno de estos cuatro fenómenos. Se inicia con la refracción, por estar relacionada con la reflexión y la transmisión.

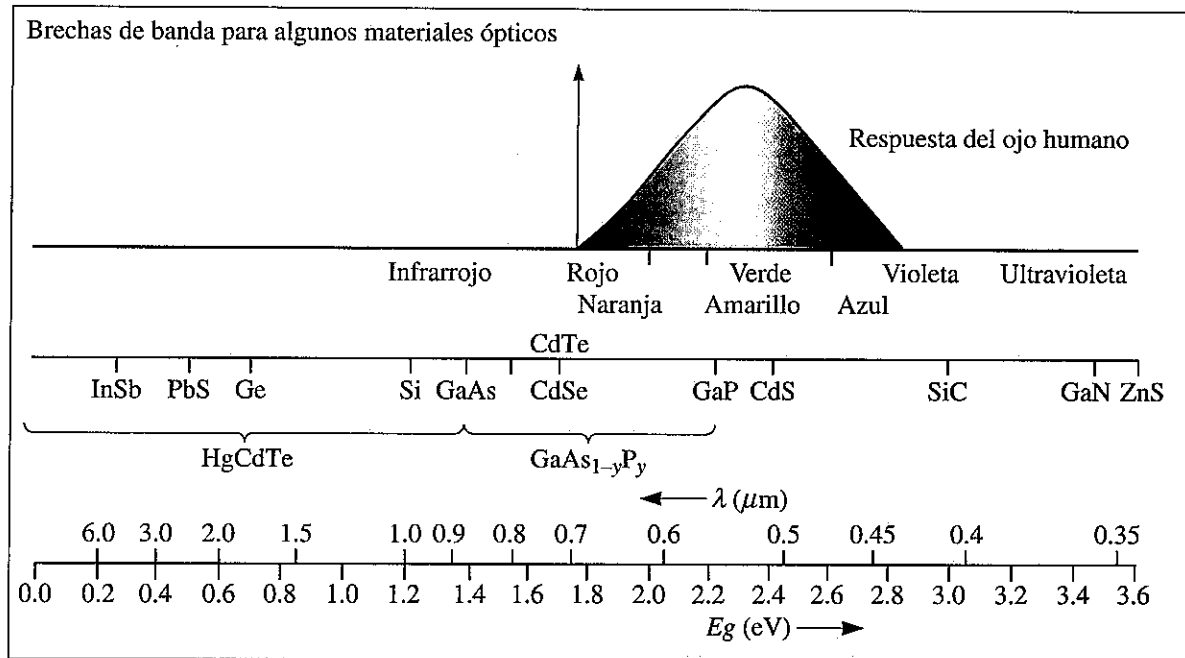
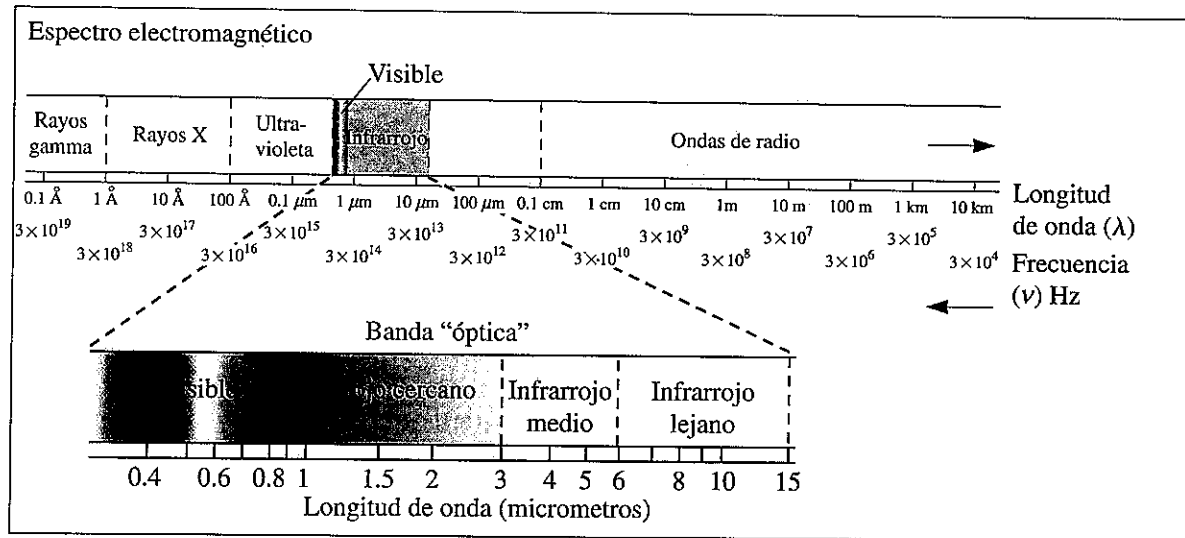


Figura 21-1 Espectro electromagnético de las radiaciones; también se muestran las brechas de banda y frecuencias de corte correspondientes a algunos materiales ópticos. (Fuente: *Optoelectronics: An Introduction to Materials and Devices*, por J. Singh. Copyright © 1996 The McGraw-Hill Companies. Reimpreso con autorización de The McGraw-Hill Companies.)

Refracción Aun cuando se transmita un fotón, éste produce la polarización de los electrones en el material y, al interactuar con el material polarizado, pierde parte de su energía. Se puede relacionar la velocidad de la luz (c) con la facilidad con la cual se polariza un material tanto eléctrica (permitividad ϵ) como magnéticamente (permeabilidad μ), por medio de

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (21-3)$$

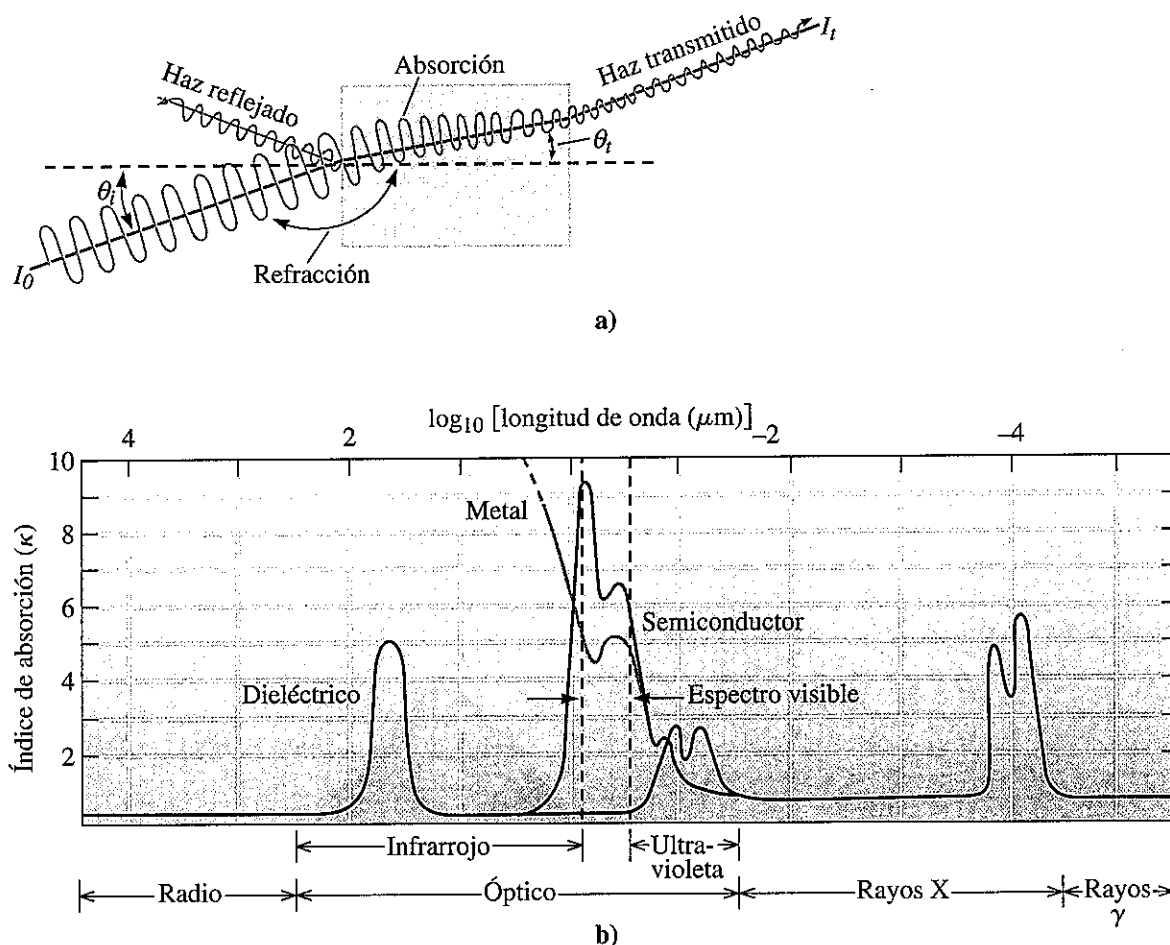


Figura 21-2 a) Interacción de fotones con un material. Además de la reflexión, la absorción y la transmisión, el rayo cambia de dirección, es decir, es refractado. El cambio de dirección está dado por el índice de refracción n . b) El índice de absorción (κ) es una función de la longitud de onda.

En general, los materiales ópticos no son magnéticos y la permeabilidad es insignificante. En vista de que se reduce la velocidad de los fotones, el haz de fotones cambia de dirección al entrar al material [figura 21-2a)]. Suponga que unos fotones que se desplazan en el vacío chocan contra un material. Si θ_i y θ_t son los ángulos formados por los rayos incidente y refractado, respectivamente, en relación con la normal a la superficie del material, entonces

$$n = \frac{c_0}{c} = \frac{\lambda_{\text{vacío}}}{\lambda} = \frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_t} \quad (21-4)$$

La relación n es el **índice de refracción**, c_0 es la velocidad de la luz en un vacío (3×10^8 m/s) y c es la velocidad de la luz dentro del material. La frecuencia de la luz no cambia cuando se refracta. En la tabla 21-1 aparecen valores comunes del índice de refracción para varios materiales.

También se puede definir un índice refractivo complejo (n^*). Esto incluye a κ , parámetro conocido como índice de absorción:

$$n^* = n(1 - i\kappa) \quad (21-5)$$

TABLA 21-1 ■ Índice de refracción para materiales seleccionados, correspondientes a fotones de una longitud de onda de 5890 Å

Material	Índice de refracción (n)	Material	Índice de refracción (n)
Aire	1.00	Poliestireno	1.60
Hielo	1.309	TiO ₂	1.74
Agua	1.333	Zafiro (Al ₂ O ₃)	1.8
Teflón™	1.35	Cristal de plomo (cristal)	2.50
SiO ₂ (vidrio)	1.46	Rutilo (TiO ₂)	2.6
Polimetilmetacrilato	1.49	Diamante	2.417
Vidrios de silicato comunes	~1.50	Silicio	3.49
Polietileno	1.52	Arseniuro de galio	3.35
Cloruro de sodio (NaCl)	1.54	Fosfuro de indio	3.21
SiO ₂ (cuarzo)	1.55	Germanio	4.0
Epoxi	1.58		

En la ecuación 21-5, $i = \sqrt{-1}$ es el número imaginario. El índice de absorción se define como

$$\kappa = \frac{\alpha\lambda}{4\pi n} \quad (21-6)$$

En la ecuación 21-6, α es el **coeficiente de absorción lineal** (vea la ecuación 21-12), λ es la longitud de onda de la luz y n es el índice de refracción. La figura 21-2b) muestra la variación en índice de absorción con la frecuencia de ondas electromagnéticas. Haciendo una analogía, el índice de refracción es similar a la constante dieléctrica de los materiales y el índice de absorción es similar al factor de pérdidas dieléctricas.

Si los fotones están viajando por el material 1, en lugar del vacío, y a continuación pasan al material 2, las velocidades de los rayos incidente y refractado dependen de la relación entre sus índices de refracción, otra vez haciendo que el rayo cambie de dirección:

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} \quad (21-7)$$

La ecuación 21-7 también se conoce como ley de Snell.

Cuando un rayo de luz entra desde un material con índice de refracción (n_1) en un material de índice de refracción (n_2), y si $n_1 > n_2$, el rayo se desvía y se aleja de la normal, hacia la superficie de frontera [figura 21-3a)]. Un rayo que atraviese el material 1 se refleja en vez de transmitirse si el ángulo θ_i llega a 90°.

Cuando el material se polariza fácilmente, ocurre una mayor interacción de los fotones con la estructura electrónica del material. En el capítulo 19 se analizaron varios mecanismos de polarización dieléctrica, entre los cuales la polarización electrónica (es decir, el desplazamiento de la nube de electrones alrededor de los átomos y de los iones) es la que controla el índice de refracción de los materiales. En consecuencia, se espera contar con una relación entre el índice de refracción n y la constante dieléctrica a altas frecuencias k_∞ del material. De las ecuaciones 21-3 y 21-4 y para materiales no ferromagnéticos o no ferrimagnéticos,

$$n = \frac{c_0}{c} = \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{\mu_0\epsilon_0}} \cong \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} = \sqrt{k_\infty} \quad (21-8)$$

En la ecuación 21-8, c_0 y c son la velocidad de la luz en un vacío y en el material, respectivamente, μ_0 y μ son las permeabilidades magnéticas del vacío y del material, respectivamente, y ϵ_0 y ϵ

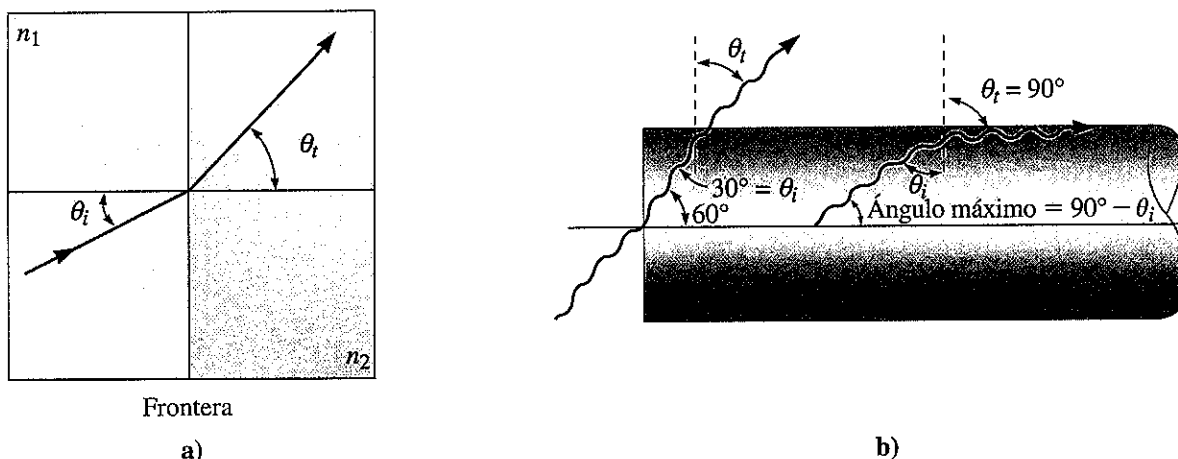


Figura 21-3 a) Cuando un rayo de luz pasa del material 1 al material 2, si el índice de refracción del material 1 (n_1) es más elevado que el del material 2 (n_2), entonces el rayo se desvía de la normal hacia la superficie de la frontera. b) Diagrama de un rayo de luz en una fibra de vidrio para el ejemplo 21-1.

son las permitividades del material y del vacío, respectivamente. Como ya se vio en el capítulo 19, el material conocido como “cristal de plomo” que en realidad es un vidrio de silicato amorfo con hasta ~30% de óxido de plomo, tiene un elevado índice de refracción ($n \sim 2.4$), dado que los iones Pb^{2+} tienen una capacidad de polarización electrónica muy alta. Se utiliza una estrategia similar para introducir una impureza a las fibras de sílice, para aumentar el índice de refracción del núcleo de las fibras ópticas en comparación con la región periférica. Esto ayuda a conservar la luz (y, por tanto, la información) en el núcleo de la fibra óptica. La diferencia entre la constante dieléctrica a alta frecuencia, y la constante dieléctrica a baja frecuencia, es una medida de los demás mecanismos de polarización que están contribuyendo a la constante dieléctrica.

El índice de refracción n no es constante para un material en particular. El índice de refracción se ve afectado por la frecuencia o longitud de onda de los fotones. La **dispersión** de un material se define como la variación de su índice de refracción en función de la longitud de onda:

$$(\text{Dispersión})_\lambda = \frac{dn}{d\lambda} \quad (21-9)$$

Esta dependencia del índice de refracción en relación con la longitud de onda no es lineal. Dentro de un material, la dispersión significa que pulsos de luz de diferentes longitudes de onda, que se inician al mismo tiempo en un extremo de una fibra óptica, llegarán en momentos diferentes al otro extremo. Por tanto, la dispersión en el material desempeña un papel importante en las fibras ópticas. Ésta es una de las razones por las cuales, para la comunicación por fibras ópticas, se prefiere utilizar una fuente de luz de una sola longitud de onda. La dispersión también causa aberración cromática en los lentes ópticos.

En vista de que la polarización dieléctrica (P) es igual al momento del dipolo por unidad de volumen, y que la constante dieléctrica a alta frecuencia está relacionada con el índice de refracción, es de esperarse que (para un mismo material), una forma más densa o polimorfa tendrá un índice de refracción más elevado (compare los índices de refracción del hielo y el agua, o bien, del vidrio y el cuarzo).

El siguiente ejemplo ilustra la forma en que se diseña una fibra óptica, para reducir al mínimo las pérdidas ópticas durante la inserción, seguido por un ejemplo de cálculo del índice de refracción.

Ejemplo 21-1**Diseño de un sistema de fibras ópticas**

Las fibras ópticas por lo general se fabrican de vidrios de silicato de alta pureza. Están formados por un núcleo que tiene un índice de refracción que es superior al índice de refracción del recubrimiento en la fibra (el recubrimiento recibe el nombre de *revestimiento*). Incluso una simple fibra de vidrio en aire puede servir como fibra óptica porque la fibra tiene un índice de refracción mayor que el del aire.

Considere un haz de fotones que es introducido desde un láser en una fibra de vidrio con índice de refracción de 1.5. Escoja el ángulo de incidencia del haz con respecto al eje de la fibra que resultará en una fuga mínima del haz desde la fibra. También considere la forma en que este ángulo puede cambiar si la fibra está sumergida en agua.

SOLUCIÓN

Para evitar fugas del rayo, se necesita una reflexión interna total y, por tanto, el ángulo θ_t debe ser al menos de 90° . Suponga que los fotones entran a un ángulo de 60° con respecto al eje de la fibra. De la figura 21-3b), se encuentra que $\theta_i = 90^\circ - 60^\circ = 30^\circ$. Si se supone que el vidrio es el material 1 y si la fibra de vidrio está en el aire ($n = 1.0$), entonces de la ecuación 21-7:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} \quad \text{o} \quad \frac{1}{1.5} = \frac{\sin 30^\circ}{\sin \theta_t}$$

$$\sin \theta_t = 1.5 \sin 30^\circ = 1.5(0.50) = 0.75 \quad \text{o} \quad \theta_t = 48.6^\circ$$

Como θ_t es menor a 90° , los fotones escapan de la fibra. Para evitar la transmisión, es preciso introducir los fotones en un ángulo menor, que dé $\theta_t = 90^\circ$.

$$\frac{1}{1.5} = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{\sin \theta_i}{\sin 90^\circ} = \sin \theta_i$$

$$\sin \theta_i = 0.6667 \quad \text{o} \quad \theta_i = 41.8^\circ$$

Si el ángulo entre el haz y el eje de la fibra es $90 - 41.8 = 48.2^\circ$ o menor, el haz se reflejará.

Si la fibra estuviera sumergida en agua ($n = 1.333$), entonces:

$$\frac{1.333}{1.5} = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{\sin \theta_i}{\sin 90^\circ} = \sin \theta_i$$

$$\sin \theta_i = 0.8887 \quad \text{o} \quad \theta_i = 62.7^\circ$$

En el agua, sería necesario introducir los fotones a un ángulo inferior a $90 - 62.7 = 27.3^\circ$ para impedir la transmisión.

Ejemplo 21-2**Transmisión de luz en polietileno**

Suponga que un rayo de fotones en el vacío choca contra una hoja de polietileno, a un ángulo de 10° en relación con la normal a la superficie del polímero. El polietileno tiene una constante dieléctrica de alta frecuencia de $k_\infty = 2.3$. Calcule el índice de refracción del polietileno, y encuentre el ángulo entre el haz incidente y el haz cuando pasa por el polímero.

SOLUCIÓN

El índice de refracción está relacionado con la constante dieléctrica de alta frecuencia:

$$n = \sqrt{k_{\infty}} = \sqrt{2.3} = 1.52$$

El ángulo θ_t es

$$n = \frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_t}$$

$$\text{sen } \theta_t = \frac{\text{sen } \theta_i}{n} = \frac{\text{sen } 10^\circ}{1.52} = \frac{0.174}{1.52} = 0.1145$$

$$\theta_t = 6.57^\circ$$

Reflexión Cuando un rayo de fotones choca contra un material, los fotones interactúan con los electrones de valencia y ceden su energía. En los metales, la radiación de casi cualquier longitud de onda excita a los electrones haciéndolos saltar a niveles más elevados de energía. Se esperaría que, si se absorben los fotones totalmente, no se refleje ninguna luz y el metal se vea negro. Sin embargo, en el aluminio o en la plata, al regresar los electrones excitados a sus niveles de energía inferiores, se vuelven a emitir de manera inmediata fotones de longitud de onda prácticamente idéntica; esto significa que tiene lugar una reflexión. Dado que se refleja prácticamente la totalidad del espectro visible, estos metales tienen un color blanco o plateado.

La **reflectividad** R muestra la fracción del rayo incidente que se refleja y está relacionada con el índice de refracción. Si el material está en el vacío o en el aire:

$$R = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 \quad (21-10)$$

Si el material está en cualquier otro medio con índice de refracción n_i , entonces

$$R = \left(\frac{n - n_i}{n + n_i} \right)^2 \quad (21-11)$$

Estas ecuaciones son aplicables a la reflexión sobre una superficie y suponen una incidencia normal (perpendicular a la superficie). El valor de R depende del ángulo de incidencia. Los materiales con un elevado índice de refracción tienen una mayor reflectividad que aquellos con un índice bajo. Dado que el índice de refracción varía con la longitud de onda de los fotones, igual ocurre con la reflectividad.

En los metales, la reflectividad comúnmente es del orden de 0.9 a 0.95, en tanto que en los vidrios comunes se acerca a 0.05. La elevada reflectividad de los metales es una de las razones por las que son *opacos*.

Existen innumerables aplicaciones en las que se desea que los materiales tengan una muy buena reflectividad. Entre ellos, se deben mencionar los espejos y ciertos tipos de recubrimientos para vidrios. De hecho, estos recubrimientos también deben diseñarse de tal manera que reflejen una gran parte del espectro electromagnético (por ejemplo, los rayos infrarrojos, es decir, la parte que produce calor). Se han creado muchos recubrimientos de este tipo para vidrios. También hay muchas aplicaciones donde la reflectividad debe limitarse al máximo. Estos recubrimientos se conocen como **antirreflejantes (AR)**; se utilizan en vidrios, en los espejos retrovisores en automóviles, en ventanas y para el vidrio de cuadros de forma que se pueda ver a través del vidrio sin que aparezca ningún reflejo.

Absorción La parte del rayo incidente que no sea reflejada por el material será absorbida o transmitida a través del mismo. La fracción del rayo que es absorbida está relacionada con el espesor del material y con la forma en que los fotones interactúan con la estructura del mismo. La intensidad del rayo después de haber pasado a través del material está dada por

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (21-12)$$

donde x es la trayectoria por la que se mueven los fotones (por lo general, el espesor del material), α es el coeficiente de absorción lineal del material para esos fotones, I_0 es la intensidad del rayo después de haber sido reflejado en la superficie anterior e I es la intensidad del rayo al llegar a la superficie posterior. La ecuación 21-12 también se conoce como ley de Bouguer, o ley de Beer-Lambert. La figura 21-4 muestra el coeficiente de absorción lineal como función de la longitud de onda para varios metales.

La absorción en materiales se presenta por varios mecanismos. En la *dispersión de Rayleigh*, los fotones interactúan con los electrones que giran en su órbita alrededor de un átomo y son desviados sin ningún cambio en su energía fotónica; éste es un ejemplo de dispersión “elástica”. La dispersión de Rayleigh es más importante para energías fotónicas más altas y es causante del color del cielo. Como el extremo azul (alta energía) del espectro visible se dispersa con más eficiencia, la luz solar dispersada por moléculas y partículas atmosféricas que llega a nuestros ojos es azul en su mayor parte. El efecto es bastante fuerte porque la intensidad de dispersión es proporcional a la energía de los fotones elevada a la cuarta potencia. La dispersión de Rayleigh también depende del tamaño de partículas y es más eficiente para partículas que son mucho menores que la longitud de onda de la luz. La dispersión desde partículas mucho más grandes que la longitud de onda de la luz ocurre por el *efecto Tyndall*. Ésta es la razón por la que las nubes, formadas por pequeñas gotas de agua, se ven blancas. La *dispersión de Compton* también ocurre cuando un fotón interactúa con un electrón, pero como el fotón entrante pierde parte de su energía al electrón, la longitud de onda de la luz aumenta; éste es un ejemplo de dispersión “inelástica”.

El *efecto fotoeléctrico* ocurre cuando la energía de un fotón es completamente absorbida, resultando en la expulsión de un electrón desde un átomo. El átomo entonces se ioniza. No se expulsan electrones cuando los fotones entrantes tienen energías menores que la energía de enlace electrónica, cualquiera que sea la intensidad de la luz. Cuando los fotones tienen energías mayores a la energía de enlace, los electrones son expulsados con una energía cinética igual a la energía fotónica menos la energía de enlace. Cuando la energía del fotón aumenta (o la longitud de onda disminuye, véase la figura 21-4), ocurre menos absorción hasta que el fotón tenga una energía igual a la de la energía de enlace. En este nivel de energía, el coeficiente

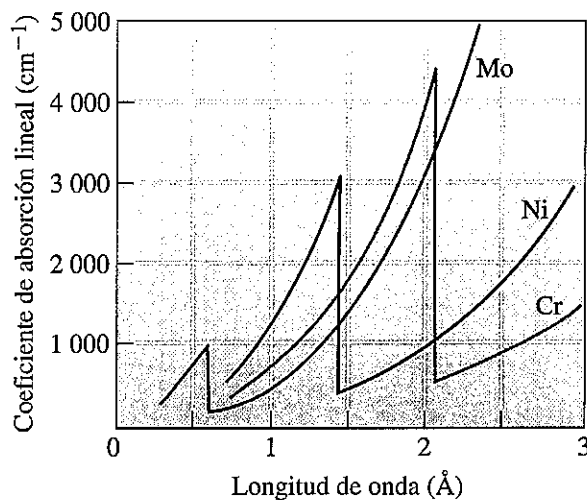


Figura 21-4
Coeficiente de absorción lineal respecto a longitudes de onda para varios metales. Obsérvese la repentina disminución en el coeficiente de absorción para longitudes de onda mayores a la del margen de absorción.

de absorción aumenta de manera abrupta porque ahora los electrones pueden ser expulsados, con lo cual resulta un medio eficiente para absorber fotones. La energía o longitud de onda a la que esto ocurre se conoce como **margen de absorción** por la forma de los picos en la figura 21-4. El abrupto cambio en el coeficiente de absorción corresponde a la energía necesaria para remover un electrón del átomo; este margen de absorción es importante para ciertas técnicas analíticas de rayos x. Albert Einstein recibió el Premio Nobel de física en 1921 por explicar el efecto fotoeléctrico.

En algunos casos, el efecto de dispersión se puede escribir como

$$I = I_0 \exp [(-\alpha_i + \alpha_s)x] \quad (21-13)$$

En la ecuación 21-13, α_i es lo que en otro tiempo se identificaba como α , que es el coeficiente de absorción intrínseca, y α_s es el coeficiente de dispersión.

En la tabla 21-2 se incluyen ejemplos de una parte de los espectros característicos para varios elementos. Las líneas K_α , K_β y L_α corresponden a las longitudes de onda de radiación emitida desde transiciones de electrones entre capas, como se verá más adelante en este capítulo.

Transmisión La fracción del haz que no es reflejada o absorbida se transmite a través del material. Con el uso de los pasos siguientes, se puede determinar la parte del haz que es transmitida (véase la figura 21-5).

1. Si la intensidad incidente es I_0 , entonces la pérdida debida a reflexión en la cara anterior de los materiales es RI_0 . La fracción del rayo incidente que en realidad penetra el material es $I_0 - RI_0 = (1 - R)I_0$:

$$I_{\text{reflejada en la cara anterior}} = RI_0$$

$$I_{\text{después de la reflexión}} = (1 - R)I_0$$

2. Una parte del haz que entra al material se pierde por absorción. La intensidad después de pasar por el material que tenga un grosor x es

$$I_{\text{después de absorción}} = (1 - R)I_0 \exp(-\alpha x)$$

3. Antes de que el haz parcialmente absorbido salga del material, ocurre una reflexión en la superficie posterior. La parte del haz que llega a la superficie posterior y es reflejada es

$$I_{\text{reflejada en la cara posterior}} = R(1 - R)I_0 \exp(-\alpha x)$$

TABLA 21-2 ■ Líneas de emisión y márgenes de absorción características para elementos seleccionados

Metal	K_α (Å)	K_β (Å)	L_α (Å)	Margen de absorción (Å)
Al	8.337	7.981	—	7.951
Si	7.125	6.768	—	6.745
S	5.372	5.032	—	5.018
Cr	2.291	2.084	—	2.070
Mn	2.104	1.910	—	1.896
Fe	1.937	1.757	—	1.743
Co	1.790	1.621	—	1.608
Ni	1.660	1.500	—	1.488
Cu	1.542	1.392	13.357	1.380
Mo	0.711	0.632	5.724	0.620
W	0.211	0.184	1.476	0.178

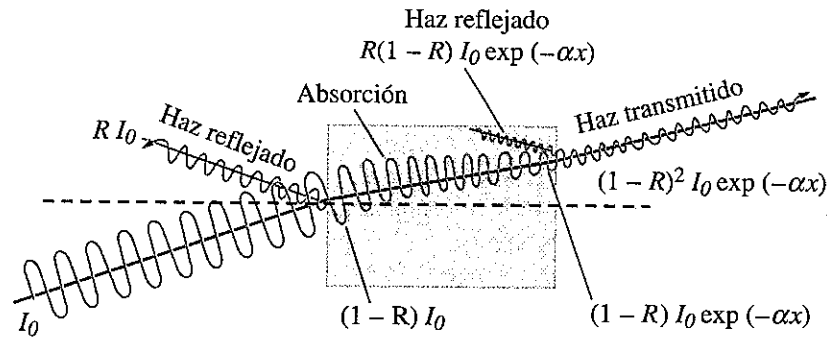


Figura 21-5 Fracciones del haz original que son reflejadas, absorbidas y transmitidas.

4. En consecuencia, la parte del haz que es transmitida por completo por el material es

$$\begin{aligned}
 I_{\text{transmitida}} &= I_{\text{después de absorción}} - I_{\text{reflejada en parte posterior}} \\
 &= (1-R)I_0 \exp(-\alpha x) - R(1-R)I_0 \exp(-\alpha x) \\
 &= (1-R)(1-R)I_0 \exp(-\alpha x) \\
 I_t &= (1-R)^2 I_0 \exp(-\alpha x)
 \end{aligned}
 \tag{21-14}$$

La intensidad del haz transmitido puede depender de la longitud de onda de los fotones del haz. En metales, en vista de que no hay brecha de energía, prácticamente cualquier fotón tiene suficiente energía para excitar un electrón a un nivel de energía superior, absorbiendo así la energía del fotón excitado [figura 21-6a)]. En consecuencia, incluso muestras extremadamente delgadas de metales son opacas. Los dieléctricos, por el contrario, poseen una gran brecha de energía entre las bandas de valencia y de conducción. Si la energía de los fotones incidentes es menor que la brecha de energía, no hay electrones que ganen suficiente energía para escapar de la banda de valencia y, por tanto, no ocurre absorción [figura 21-6b)]. En semiconductores intrínsecos, la brecha de energía es más pequeña que la de

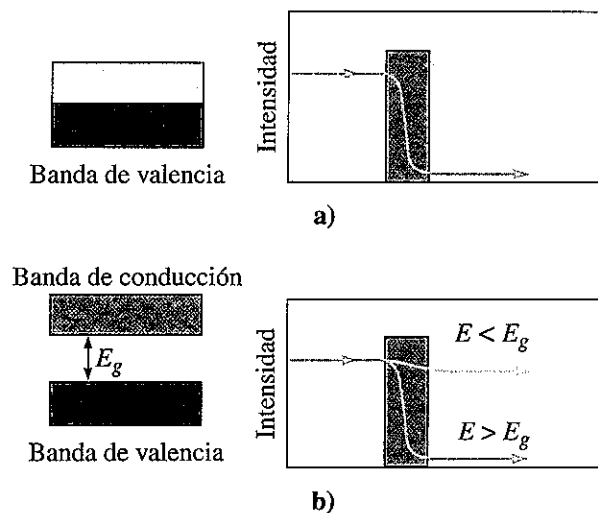
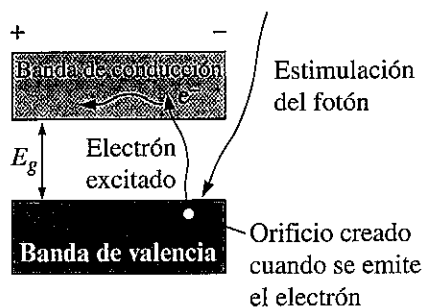


Figura 21-6 Relaciones entre absorción y la brecha de energía: a) metales y b) dieléctricos y semiconductores intrínsecos. El diagrama de la izquierda representa la estructura de banda del material bajo consideración. El diagrama de la derecha representa la intensidad de la luz cuando pasa del aire y penetra en el material y regresa al aire.

aislantes, y ocurre absorción cuando los fotones tienen energías que rebasan la brecha de energía E_g , mientras que ocurre transmisión para fotones con menos energía [figura 21-6b) que también se aplica a semiconductores]. En otras palabras, sólo se absorbe luz debajo de cierta longitud de onda. Los semiconductores extrínsecos incluyen niveles de energía de donantes y aceptantes dentro de la brecha de banda que da niveles de energía adicionales para absorción. Por tanto, los semiconductores son opacos a la radiación de longitud de onda corta pero transparentes a fotones de longitud de onda larga (véase el ejemplo 21-3). Por ejemplo, el silicio y el germanio aparecen opacos a la luz visible, pero son transparentes a la radiación infrarroja de longitud de onda más larga. Muchos de los semiconductores de brecha de banda angosta (por ejemplo HgCdTe) se usan para detección de la radiación infrarroja. Estos materiales detectores tienen que ser enfriados a temperaturas bajas (por ejemplo usando nitrógeno líquido), porque de otra forma la energía térmica de los electrones a temperatura ambiente es suficiente para saturar la banda de conducción.

La intensidad del rayo transmitido también depende de características microestructurales. En los materiales cerámicos, la porosidad dispersa a los fotones; incluso una pequeña cantidad de porosidad (menos del 1% en volumen) puede hacer que el material cerámico sea opaco. Por ejemplo, la alúmina, que tiene una densidad relativamente baja, es opaca, en tanto que una alúmina de alta densidad es ópticamente transparente. Este material se utiliza con frecuencia en la manufactura de focos. Los precipitados cristalinos, en particular aquellos que tienen un índice de refracción muy distinto del material de la matriz, también causan dispersión. Estos *opacadores* cristalinos hacen que un vidrio, que por lo general puede tener una buena transparencia, se haga translúcido o incluso opaco. Comúnmente, poros o precipitados más pequeños causan una mayor reducción en la transmisión de luz.

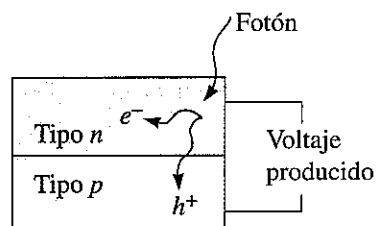
La **fotoconducción** se presenta en materiales semiconductores si el semiconductor forma parte de un circuito eléctrico. Si es suficiente la energía del fotón que llega, se excita un electrón hacia la banda de conducción o se crea un orificio en la banda de valencias. Entonces el electrón o el orificio transportan una carga a través del circuito [figura 21-7a)]. La máxima



a)

Figura 21-7

a) Fotoconducción en semiconductores que comprende la absorción de un estímulo por electrones excitados que salen de la banda de valencia hacia la banda de conducción. En lugar de regresarse a la banda de valencia para causar una emisión, los electrones excitados transportan una carga por un circuito eléctrico.



b)

longitud de onda del fotón incidente que producirá fotoconducción está relacionada con la brecha de energía en el material semiconductor:

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{hc}{E_g} \quad (21-15)$$

Se puede utilizar este principio para los fotodetectores u “ojos eléctricos” que abren y cierran puertas o abren y cierran interruptores cuando se bloquea un haz de luz enfocado sobre un material semiconductor.

Las **celdas solares** también utilizan la absorción de luz para generar un voltaje [figura 21-7b)]. En esencia, los pares electrón-orificio generados por absorción óptica están separados, lo cual lleva a la aparición de un voltaje. Este voltaje crea un flujo de corriente en un circuito externo. Las celdas solares son uniones *p-n* diseñadas de forma que los fotones exciten a los electrones hacia la banda de conducción. Los electrones se mueven al lado *n* de la unión, en tanto que los orificios se mueven al lado *p* de la unión. Este movimiento produce un voltaje de contacto debido al desequilibrio de cargas. Si la unión *p-n* se conecta a un circuito eléctrico, la unión actúa como batería para energizar el circuito. Las celdas solares hacen uso de recubrimientos antirreflejantes de modo que se capten al máximo los elementos clave del espectro solar.

LED Como ya se vio en el capítulo 19, la luz absorbida por un semiconductor de brecha de banda directa hace que los electrones sean promovidos a la banda de conducción. Cuando estos electrones regresan a la banda de valencia, se combinan con los orificios causando emisiones de luz. Se pueden adaptar muchas soluciones sólidas semiconductoras para tener brechas de banda diferentes y producir diodos LED de distintos colores. Este fenómeno también se utiliza en los diodos emisores de luz y en los láseres semiconductores (figura 21-8). El diseño de los LED se estudia más adelante en este capítulo.

Los siguientes ejemplos ilustran aplicaciones de muchos de estos conceptos relacionados con la absorción y la transmisión de luz.

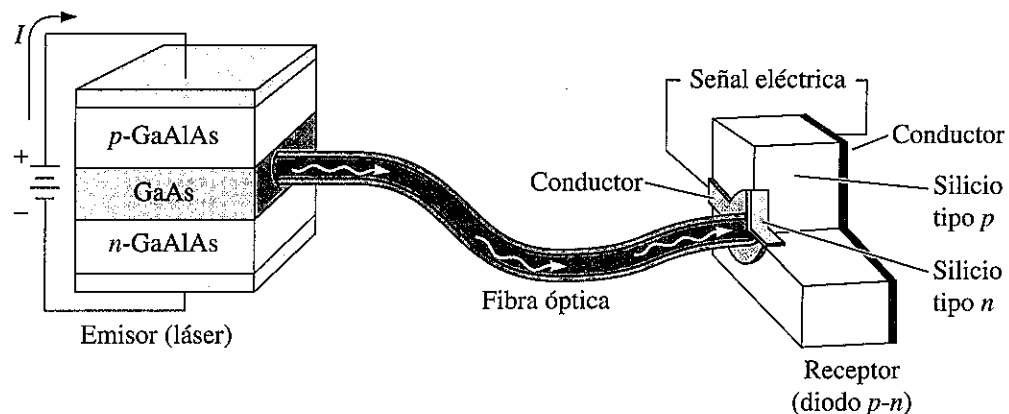


Figura 21-8 Los elementos de un sistema fotónico para transmitir información incluyen un láser o LED para generar fotones a partir de una señal eléctrica, fibras ópticas para transmitir el haz de fotones de manera eficiente y un receptor LED para convertir los fotones de nuevo en una señal eléctrica.

Ejemplo 21-3*Determinación de brechas de energía críticas*

Determine las brechas de energía críticas para un semiconductor que dé transmisión completa, así como absorción completa de fotones del espectro visible.

SOLUCIÓN

Para que ocurra una transmisión completa, la brecha de banda del semiconductor debe ser más grande que las energías de todos los fotones del espectro visible. El espectro de luz visible varía de 4×10^{-5} cm a 7×10^{-5} cm. Los fotones con longitudes de onda más cortas tienen energías más altas. Entonces, la mínima energía E_g de brecha de banda necesaria para asegurar que ninguno de los fotones del espectro visible sea absorbido (y todos los fotones sean transmitidos) es

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(3 \times 10^{10} \text{ cm/s})}{(4 \times 10^{-5} \text{ cm})(1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV})} = 3.1 \text{ eV}$$

Si la brecha de banda del semiconductor es 3.1 eV o mayor, todos los fotones del espectro visible serán transmitidos.

Para que un fotón sea absorbido, la brecha de energía del semiconductor debe ser menor que la energía del fotón. Los fotones con longitudes de onda más largas tienen menores energías. Por tanto, la máxima energía de brecha de banda que tomará en cuenta la absorción completa de todas las longitudes de onda del espectro visible es

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(3 \times 10^{10} \text{ cm/s})}{(7 \times 10^{-5} \text{ cm})(1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV})} = 1.8 \text{ eV}$$

Si la brecha de banda es 1.8 eV o menor, todos los fotones del espectro visible serán absorbidos. Para semiconductores con una E_g entre 1.8 y 3.1 eV, una parte de los fotones del espectro visible será absorbida.

Ejemplo 21-4*Diseño de un escudo contra la radiación*

Un material tiene una reflectividad de 0.15 y un coeficiente de absorción (α) de 100 cm^{-1} . Diseñe un escudo que permita la transmisión de sólo el 1% de la radiación incidente a través del material.

SOLUCIÓN

De la ecuación 21-14, la fracción de la intensidad incidente que será transmitida es

$$\frac{I_t}{I_0} = (1 - R)^2 \exp(-\alpha x)$$

y se puede determinar el grosor necesario del escudo:

$$\begin{aligned} 0.01 &= (1 - 0.15)^2 \exp(-100x) \\ \frac{0.01}{(0.85)^2} &= 0.01384 = \exp(-100x) \\ \ln(0.01384) &= -4.28 = -100x \\ x &= 0.0428 \text{ cm} \end{aligned}$$

El material debe tener un grosor de 0.0428 cm para que sólo transmita el 1% de la radiación incidente.

Si así se deseara, se podría determinar la cantidad de radiación que se pierde en cada paso:

$$\text{Reflexión en la cara anterior: } I_r = RI_0 = 0.15I_0$$

$$\text{Intensidad después de la reflexión: } I = I_0 - 0.15I_0 = 0.85I_0$$

$$\text{Intensidad después de la absorción: } I_a = (0.85)I_0 \exp[(-100)(0.0428)] = 0.0118I_0$$

$$\text{Intensidad absorbida: } 0.85I_0 - 0.0118I_0 = 0.838I_0$$

$$\text{Reflexión en la cara posterior: } I_r = R(1 - R)I_0 \exp(-\alpha x)$$

$$= (0.15)(1 - 0.15)I_0 \exp[-(100)(0.0428)] = 0.0018I_0$$

21-3 Absorción, transmisión o reflexión selectivas

Cuando los fotones se absorben, transmiten o reflejan de manera selectiva, se observa un comportamiento óptico fuera de lo común. Ya se ha visto que los semiconductores transmiten fotones de longitud de onda larga, pero absorben radiaciones de longitud de onda corta. Existe una diversidad de otras situaciones en las cuales una selectividad similar produce propiedades ópticas no comunes.

En ciertos materiales, el reemplazo de los iones normales por transición o por elementos de tierras raras produce un *campo de cristal*, el cual crea nuevos niveles de energía dentro de la estructura. Este fenómeno se presenta cuando los iones Cr^{3+} reemplazan en el Al_2O_3 a los iones Al^{3+} . Los nuevos niveles de energía absorben luz visible en las porciones violeta y verde-amarillo del espectro. Las longitudes de onda del rojo se transmiten, dando el color rojizo en el rubí. Además, el reemplazo del ion Cr genera un nivel de energía que permite que aparezca la luminiscencia (se analiza más adelante) cuando los electrones son excitados por un estímulo. Los rayos láser generados a partir del rubí impurificado con cromo producen, por esta razón, un rayo o haz rojo característico.

Los vidrios también pueden impurificarse con iones que producen absorción y transmisión selectivas (tabla 21-3). Del mismo modo, trampas de electrones u orificios llamados *centros F*, pueden estar presentes en cristales. Cuando se forma fluorita (CaF_2) para que exista un exceso de calcio, se produce una vacancia de ion de fluoruro. Para mantener neutralidad eléctrica, un electrón queda atrapado en la vacancia, produciendo niveles de energía que absorben todos los fotones visibles, a excepción del morado.

Los polímeros, en particular los que contienen un anillo aromático en su estructura, pueden tener enlaces covalentes complejos que producen una estructura de nivel de energía que causa absorción selectiva. Por esta razón, la clorofila de las plantas aparece verde, y la hemoglobina de la sangre aparece roja.

TABLA 21-3 ■ Efecto de los iones en los colores producidos en vidrios

Ion	Color	Ion	Color
Cr^{2+}	Azul	Mn^{2+}	Naranja
Cr^{3+}	Verde	Fe^{2+}	Azul-verde
Cu^{2+}	Azul-verde	U^{6+}	Amarillo

21-4 Ejemplos y uso de fenómenos de emisión

Algunos ejemplos particulares de los fenómenos de emisión que, por sí mismos, logran algunas funciones conocidas e importantes son los siguientes.

Rayos gamma. Interacciones nucleares Los rayos gamma, que son fotones de muy alta energía, son emitidos durante la desintegración radiactiva de los núcleos inestables de ciertos átomos. La energía de los rayos gamma, por tanto, depende de la estructura del núcleo atómico y varía de un material a otro. Los rayos gamma producidos de un material tienen longitudes de onda fijas. Cuando se desintegra el cobalto 60, por ejemplo, se emiten rayos gamma con energías de 1.17×10^6 y 1.34×10^6 eV (es decir, longitudes de onda de 1.06×10^{-10} cm y 0.93×10^{-10} cm). Los rayos gamma pueden utilizarse como fuente de radiación para detectar fallas que ocurren dentro de un material (una prueba no destructiva).

Rayos x. Interacciones en las capas electrónicas internas Los rayos x, que tienen una energía un poco menor que la de los rayos gamma, se producen al estimular los electrones en las capas internas de un átomo. El estímulo puede ser de electrones de alta energía u otros rayos x. Al ocurrir la estimulación, se emiten rayos x de una amplia gama de energía. Se producen un espectro continuo y uno característico de los rayos x.

Suponga que un electrón de alta energía choca contra un material. Conforme el electrón se desacelera, se libera energía y se emite en forma de fotones. Cada vez que un electrón choca con un átomo, cede una parte de su energía. Sin embargo, cada interacción puede ser más o menos severa, por lo que el electrón va cediendo una fracción distinta de su energía cada vez y genera fotones de longitudes de onda diferentes (figura 21-9). Se produce un **espectro continuo** (la parte lisa de las curvas de la figura 21-10). En el caso de que el electrón perdiera toda su energía en un impacto, la longitud de onda mínima de los fotones emitidos

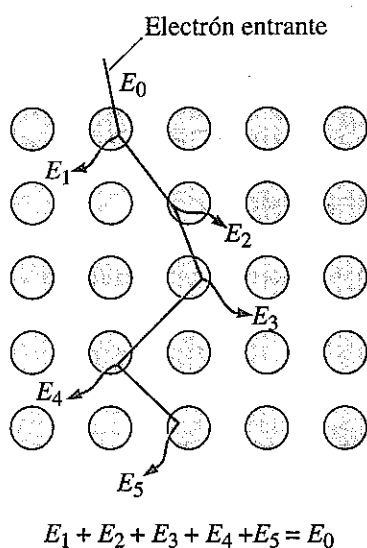


Figura 21-9

Cuando un electrón acelerado choca e interactúa con un material, su energía se puede reducir en una serie de pasos. En el proceso, se emiten varios fotones de energías diferentes E_1 a E_5 , cada uno de ellos con una longitud de onda única.

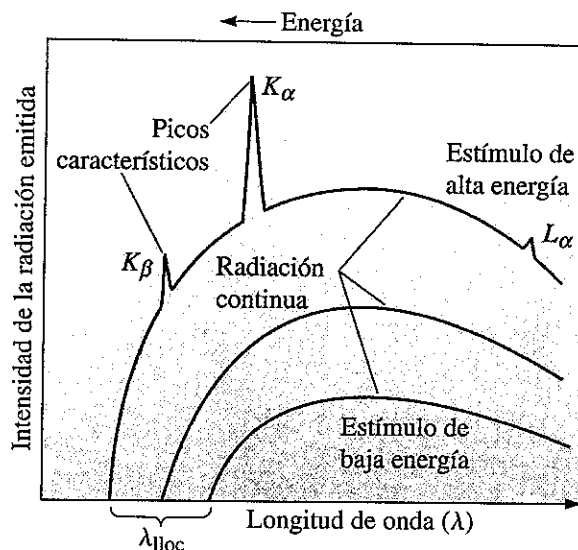


Figura 21-10

Espectros continuos y característicos de radiación emitida desde un material. Los estímulos de baja energía producen un espectro continuo de fotones de baja energía y de longitud de onda larga. Cuando el estímulo es más poderoso, se emite un espectro más intenso y de energía más alta, hasta que, finalmente, se observa la radiación característica.

correspondería a la energía original del estímulo. La longitud de onda mínima de rayos x producida recibe el nombre de **límite de longitud de onda corta** λ_{lloc} . El límite de longitud de onda corta disminuye, y aumenta el número y energía de los fotones emitidos cuando se incrementa la energía del estímulo.

El estímulo entrante puede tener suficiente energía para excitar un electrón de una capa interna hacia una capa externa de energía. El electrón excitado no es estable y, para recuperar el equilibrio, el nivel energético interior se llena con electrones de un nivel superior. Este proceso lleva a la emisión de un **espectro característico** de rayos x que es distinto para cada tipo de átomo.

El espectro característico se produce porque existen diferencias discretas de energía entre dos niveles cualesquiera de energía. Cuando un electrón baja de un nivel a un segundo nivel inferior, se emite un fotón con esa energía y longitud de onda particulares. Este efecto se ilustra en la figura 21-11. En general, los niveles de energía utilizan la designación $K, L, M, \dots$, como se describe en el capítulo 2. Si un electrón se excita partiendo de la capa K , esta vacancia puede llenarse con electrones de una capa externa. Normalmente, estas vacancias se llenan con electrones provenientes de las capas más cercanas. Entonces, se emiten fotones con energías $\Delta E = E_K - E_L$ (rayos x K_α) o $\Delta E = E_K - E_M$ (rayos x K_β). Cuando un electrón de la capa M llena la capa L , se emite un fotón de energía $\Delta E = E_L - E_M$ (rayos x L_α); tiene una longitud de onda larga, o una baja energía. Obsérvese que es necesario un estímulo más enérgico para la producción de rayos x K_α que los necesarios para los rayos x L_α .

Como consecuencia de la emisión de fotones que tienen una longitud de onda característica, sobre el espectro continuo se superpone una serie de picos (figura 21-10). Las longitudes de onda a las cuales se presentan dichos picos son específicas para el tipo de átomo (tabla 21-2). Por tanto, cada elemento produce un espectro característico diferente que sirve como "huella dactilar" para dicho tipo de átomo. Si se hacen coincidir las longitudes de onda características emitidas con las esperadas para diversos elementos, se puede determinar la identidad del material. También es posible medir la intensidad de los picos característicos. Al comparar intensidades medidas con las estándar, es posible estimar cuál es el porcentaje de cada tipo de átomo de material y entonces estimar la composición del mismo. Cuando un haz de electrones choca con una muestra (como ocurre en un microscopio electrónico de transmisión o barrido) se puede analizar la energía o la longitud de onda de los rayos x emitidos, para obtener

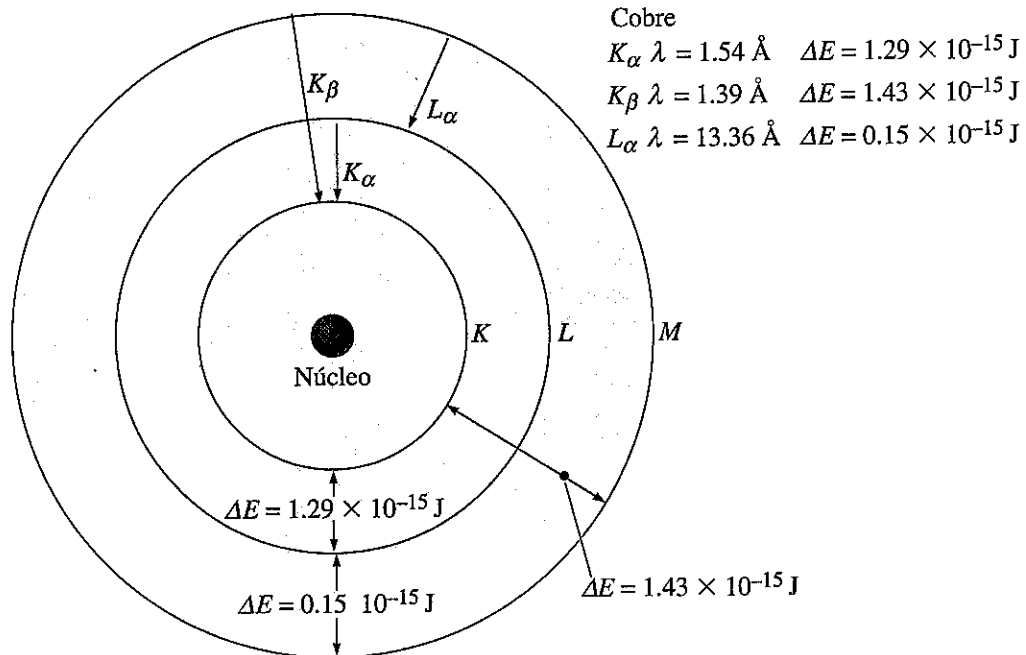


Figura 21-11 Cuando los electrones cambian de un nivel de energía a otro nivel inferior, se producen rayos x característicos, como se ilustra aquí para el cobre. La energía y la longitud de onda de los rayos x están fijadas por las diferencias de energía entre los niveles de energía.

información química de una muestra. Esta técnica se conoce como análisis de dispersión de energía de rayos x (EDXA). Los ejemplos que siguen ilustran la aplicación de las emisiones de rayos x utilizadas en las técnicas analíticas XRD y EDXA.

Ejemplo 21-5

Diseño y selección de materiales para un filtro de rayos x

Diseñe un filtro que absorba de manera selectiva emisiones K_{β} de rayos x del espectro del níquel, pero que permita pasar con poca absorción las emisiones K_{α} . Este tipo de filtro se utiliza en análisis de materiales por difracción de rayos x (XRD).

SOLUCIÓN

Cuando se determina una estructura cristalina o se identifican materiales desconocidos usando diversas técnicas de difracción de rayos x, es preferible utilizar rayos x de una sola longitud de onda. Si se encuentran los dos picos característicos K_{α} y K_{β} e interactúan con el material, el análisis resulta mucho más difícil.

Para evitar esta dificultad, se puede usar una absorción selectiva para aislar el pico K_{α} . La tabla 21-2 incluye la información que se necesita. Si el material de filtro se selecciona de modo que el margen de absorción se encuentre entre las longitudes de onda K_{α} y K_{β} , entonces la K_{β} casi se absorbe por completo, mientras que la K_{α} se transmite casi completamente. En el níquel, $K_{\alpha} = 1.660 \text{ \AA}$ y $K_{\beta} = 1.500 \text{ \AA}$. Un filtro con un margen de absorción entre estos picos característicos funcionará. El cobalto, con un margen de absorción de $1.608 \text{ \AA}$, no sería opción. La figura 21-12 muestra la forma en que ocurre este proceso de filtrado.

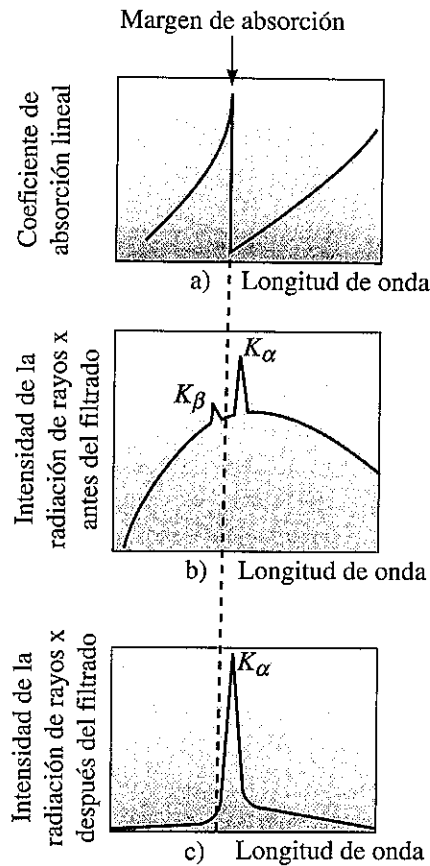


Figura 21-12

Los elementos tienen una falta selectiva de absorción de ciertas longitudes de onda. Si se selecciona un filtro con un margen de absorción entre los picos K_α y K_β de un espectro de rayos x, todos los rayos x excepto el K_α son absorbidos (para el ejemplo 21-5). a) Coeficiente de absorción lineal de un material de filtro como función de una longitud de onda; b) intensidad de la radiación de rayos x antes del filtrado, y c) intensidad de la radiación de rayos x después del filtrado.

Ejemplo 21-6

Diseño de un filtro de rayos x

Diseñe un filtro que transmita al menos 95% de la energía de un haz compuesto de rayos x K_α de zinc, usando aluminio como material de escudo. (El aluminio tiene un coeficiente de absorción lineal de 108 cm^{-1} .) Suponga que no hay pérdida por reflexión.

SOLUCIÓN

Suponiendo que no hay pérdidas causadas por la reflexión de rayos x provenientes del aluminio, simplemente se necesita escoger el grosor del aluminio requerido para transmitir 95% de la intensidad incidente. La intensidad final, por tanto, será de $0.95I_0$. Entonces, de la ecuación 21-12,

$$\ln\left(\frac{0.95I_0}{I_0}\right) = -(108)(x)$$

$$\ln(0.95) = -0.051 = -108x$$

$$x = \frac{-0.051}{-108} = 0.00047 \text{ cm}$$

Se desearía laminar el aluminio a un grosor de 0.00047 cm o menos. El filtro podría ser más grueso si se seleccionara un material que tenga un menor coeficiente de absorción lineal para rayos x K_{α} de zinc.

Ejemplo 21-7

Generación de rayos x a partir de difracción de rayos x (XRD)

Suponga que un electrón acelerado por 5 000 V choca contra un objetivo de cobre. ¿Qué rayos x se emitirán de este objetivo de cobre, los K_{α} , K_{β} o L_{α} ?

SOLUCIÓN

El electrón debe poseer energía suficiente para excitar un electrón a un nivel superior, o su longitud de onda debe ser inferior a la que corresponda a la diferencia de energía entre las capas:

$$E = (5000 \text{ eV})(1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}) = 8 \times 10^{-16} \text{ J}$$

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{(6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(3 \times 10^{10} \text{ cm/s})}{8 \times 10^{-16} \text{ J}}$$

$$= 2.48 \times 10^{-8} \text{ cm} = 2.48 \text{ Å}$$

Nótese que un electrón volt (eV) es la energía cinética adquirida por un electrón que se mueve por una diferencia de potencial de un volt.

Para el cobre, K_{α} es 1.542 Å, K_{β} es 1.392 Å y L_{α} es 13.357 Å (tabla 21-2). Por tanto, el pico L_{α} puede ser producido, no así los K_{α} y K_{β} .

Ejemplo 21-8

Análisis de dispersión de energía de rayos x (EDXA)

La microfotografía de la figura 21-13 se obtuvo con el uso de un microscopio electrónico de barrido a una amplificación de 1000. El haz de electrones del microscopio electrónico fue dirigido en tres fases diferentes, creando rayos x y produciendo los picos característicos. De los espectros de energía, determine la probable composición de cada fase. Suponga que cada una de las regiones representa una fase diferente.

SOLUCIÓN

Las tres fases tienen un pico de energía de alrededor de 1.5 keV = 150 eV, que corresponde a una longitud de onda de

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{(6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(3 \times 10^{10} \text{ cm/s})}{(1500 \text{ eV})(1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV})(10^{-8} \text{ cm/Å})} = 8.283 \text{ Å}$$

De una forma similar, se pueden hallar las energías y longitudes de onda de los demás picos. Estas longitudes de onda se comparan con las de la tabla 21-2, y se puede hallar la identidad de los elementos de cada una de las fases, como se resume en la siguiente tabla.

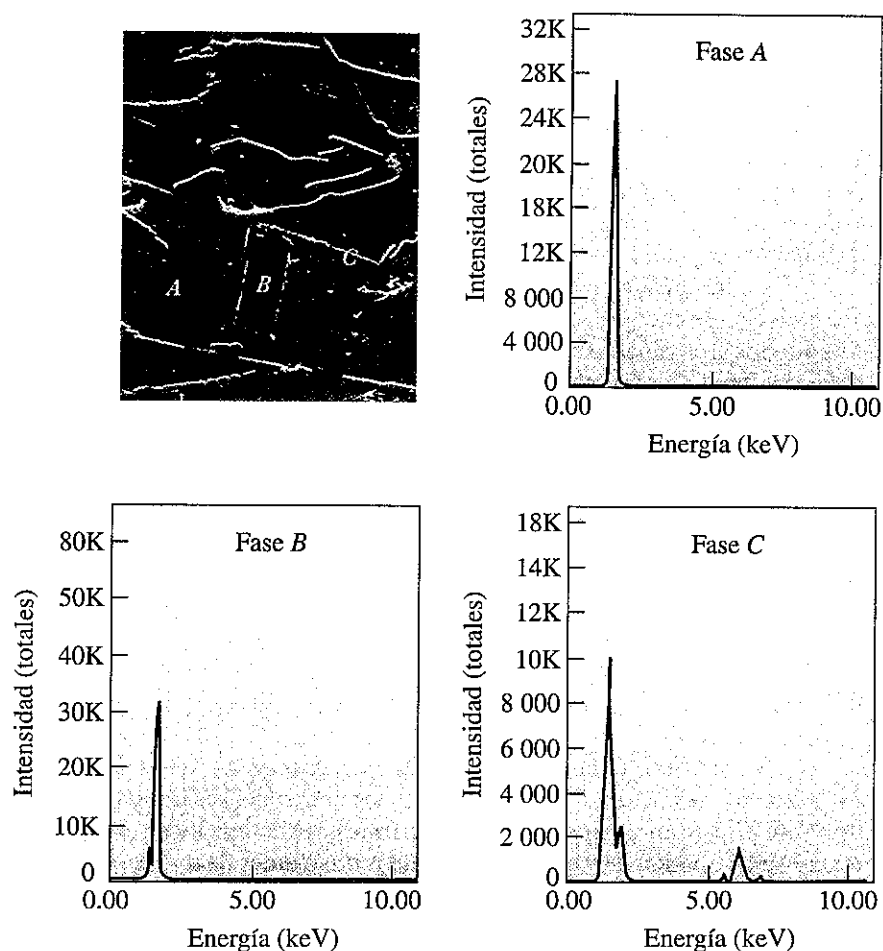


Figura 21-13 Microfotografía de microscopio electrónico de un material de fase múltiple. Se muestran las distribuciones de la energía de radiación emitida desde las tres fases marcadas A, B y C. La identidad de cada fase está determinada en el ejemplo 21-8. (Reproducida por cortesía de Don Askeland.)

Fase	Energía pico	λ	λ (tabla 21-2)	Línea
A	1.5 keV	8.283 Å	8.337 Å	K_{α} Al
B	1.5 keV	8.283 Å	8.337 Å	K_{α} Al
	1.7 keV	7.308 Å	7.125 Å	K_{α} Si
C	1.5 keV	8.283 Å	8.337 Å	K_{α} Al
	1.7 keV	7.308 Å	7.125 Å	K_{α} Si
	5.8 keV	2.142 Å	2.104 Å	K_{α} Mn
	6.4 keV	1.941 Å	1.937 Å	K_{α} Fe
	7.1 keV	1.750 Å	1.757 Å	K_{β} Fe

Entonces, la fase A parece ser una matriz de aluminio, la fase B parece ser una aguja de silicio (que contiene quizá un poco de aluminio) y la fase C parece ser un compuesto de Al-Si-Mn-Fe. En realidad, ésta es una aleación de aluminio y silicio. Las fases estables son aluminio y silicio, formándose inclusiones debido a la presencia de impurezas de manganeso y hierro.

Luminiscencia. Interacciones de las capas electrónicas externas

Si bien los rayos x se producen por las transiciones de electrones en los niveles inferiores de energía de un átomo, la **luminiscencia** es la conversión de radiaciones y otras formas de energía en luz visible. La luminiscencia se presenta cuando la radiación incidente excita electrones de la banda de valencia a la banda de conducción. Los electrones excitados permanecen sólo brevemente en los niveles superiores de energía. Cuando los electrones regresan a la banda de valencia, se emiten fotones. Si la longitud de onda de estos fotones está en la escala de luz visible, ocurre luminiscencia.

La luminiscencia no se presenta en metales. Los electrones simplemente son excitados a niveles de energía superiores dentro de la banda de valencia no ocupada por completo. Cuando los electrones excitados regresan al nivel inferior de energía, el fotón que se produce tiene una energía muy pequeña y una longitud de onda más larga que la de la luz visible [figura 21-14a)].

No obstante, en ciertos materiales cerámicos y semiconductores, la brecha de energía entre las bandas de valencia y de conducción es tal, que un electrón que pase por la misma producirá un fotón en la escala visible. Se observan dos efectos diferentes en estos materiales luminiscentes: fluorescencia y fosforescencia. En la **fluorescencia**, todos los electrones excitados vuelven a la banda de valencia, emitiendo los fotones correspondientes en un tiempo muy corto ($\sim 10^{-8}$ segundos) después de retirar el estímulo [figura 21-14b)]. Predomina una longitud de onda correspondiente a la brecha de energía E_g . En numerosas técnicas avanzadas en bioquímica e ingeniería biomédica se utilizan tinturas fluorescentes y microscopía. Para el análisis químico de materiales hay un uso generalizado de la fluorescencia de rayos x (XRF).

Los materiales **fosforescentes** contienen impurezas que introducen un nivel de donante en la brecha de energía [figura 21-14c)]. Los electrones excitados bajan primero al nivel de donante y quedan atrapados. Los electrones deben entonces escapar de la trampa antes de volver a la banda de valencia. Existe un retraso antes de que se emitan los fotones. Cuando se elimina la fuente, los electrones de las trampas se van escapando en forma gradual y emiten luz durante un tiempo adicional. La intensidad de la luminiscencia está dada por

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\frac{t}{\tau} \quad (21-16)$$

donde τ es el **tiempo de relajación**, que es una constante para el material. Después del tiempo t posterior a la eliminación de la fuente, la intensidad de la luminiscencia se reduce de I_0 a I .

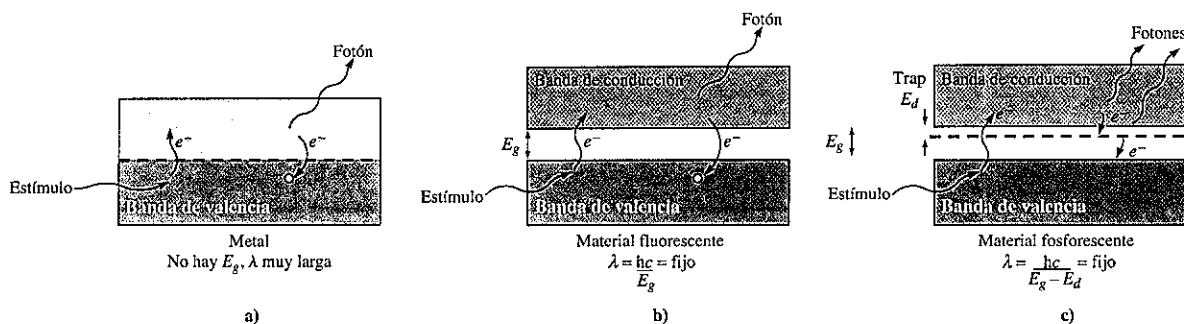


Figura 21-14 Ocurre luminiscencia cuando los fotones tienen una longitud de onda en el espectro visible.

a) En metales no hay brecha de energía, por lo que no hay luminiscencia. b) Puede presentarse fluorescencia si hay brecha de energía. c) Hay fosforescencia cuando los fotones son emitidos en un periodo debido a trampas de donantes en la brecha de energía.

Los materiales fosforescentes son muy importantes en la operación de pantallas de televisores. En este caso, el tiempo de relajación no debe ser muy largo porque de lo contrario las imágenes empiezan a traslaparse. En la televisión a color se utilizan tres tipos de materiales fosforescentes; las brechas de energía están diseñadas de modo que se producen colores rojo, verde y azul. Las pantallas de osciloscopios y de radar se basan en el mismo principio. Las lámparas fluorescentes contienen vapor de mercurio. Éste, en presencia de un arco eléctrico, fluoresce y emite luz ultravioleta. El interior del vidrio de estas lámparas está recubierto con un material fosforescente. La función de este material es convertir la radiación ultravioleta de longitud de onda pequeña en luz visible. Los tiempos de relajación van de 5×10^{-9} segundos a unos 2 segundos. El siguiente ejemplo ilustra la selección de un fósforo para una pantalla de televisión.

Ejemplo 21-9

Diseño y selección de materiales para una pantalla de televisión

Seleccione un material fosforescente que produzca una imagen azul en una pantalla de televisión.

SOLUCIÓN

Los fotones con energías que correspondan al color azul tienen longitudes de onda de unos 4.5×10^{-5} cm (figura 21-1). Por tanto, la energía de los fotones emitidos es

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(4.14 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s})(3 \times 10^{10} \text{ cm/s})}{4.5 \times 10^{-5} \text{ cm}} \\ = 2.76 \text{ eV}$$

La figura 21-1 incluye brechas de energía para varios materiales. Ninguno de los materiales de esa lista tiene una E_g de 2.76 eV, pero el ZnS tiene una E_g de 3.54 eV. Si se introduce un contaminante apropiado para dar una trampa de $3.54 - 2.76 = 0.78$ eV debajo de la banda de conducción, se presentará fosforescencia.

También sería necesaria información respecto al tiempo de relajación, para asegurar que la fosforescencia no persista lo suficiente para distorsionar la imagen. Los materiales fosforescentes comunes para pantallas de televisión podrían incluir el CaWO_4 , que produce fotones con longitud de onda de 4.3×10^{-5} cm (azul). Este material tiene un tiempo de relajación de 5.1×10^{-5} s (verde), mientras que el $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ contaminado con manganeso produce fotones con longitud de onda de 6.45×10^{-5} cm (rojo).

Diodos emisores de luz. Electroluminiscencia La luminiscencia se puede utilizar ventajosamente para crear **diodos emisores de luz (LED)**. Los LED se emplean para carátulas de relojes de pulsera, de mesa, pantallas de calculadoras y otros aparatos electrónicos. El estímulo para estos dispositivos es un voltaje aplicado externamente, que produce transiciones electrónicas y **electroluminiscencia**. Los LED son dispositivos de unión *p-n* diseñados para que la E_g se encuentre en el espectro visible (con frecuencia, rojo). Un voltaje aplicado al diodo en polarización directa hace que orificios y electrones se recombinen en la unión y emitan fotones (figura 21-15). El GaAs, GaP, GaAlAs y GaAsP son materiales típicos para los LED.

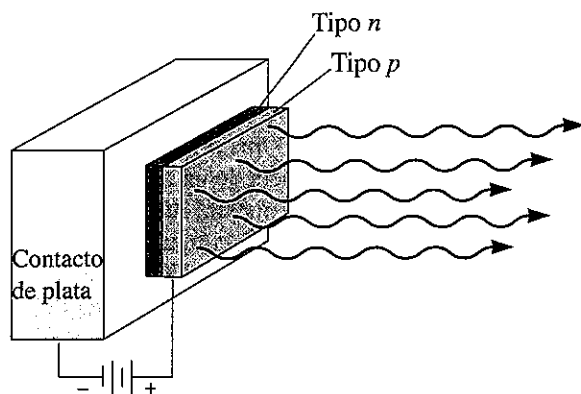
**Figura 21-15**

Diagrama de un diodo emisor de luz (LED). Un voltaje de polarización directa aplicado en paralelo a la unión p - n produce fotones.

Láseres. Amplificación de luminiscencia

El láser (*light amplification by stimulated emission of radiation*) es otro ejemplo de una amplificación especial de luminiscencia. En ciertos materiales, los electrones excitados por un estímulo producen fotones que, a su vez, excitan fotones adicionales de idéntica longitud de onda. En consecuencia, se presenta una gran amplificación de los fotones emitidos en el material. Por medio de una selección apropiada del estimulante y del material, la longitud de onda de los fotones puede resultar en la escala visible. La salida del láser es un haz de fotones paralelos de la misma longitud de onda y, por tanto, son coherentes. En un haz *coherente* la naturaleza ondulatoria de los fotones está en fase, por lo que no ocurre interferencia destructiva. Los láseres son útiles en el tratamiento térmico y en la fusión de metales, en soldadura, en cirugías, así como en la transmisión y procesamiento de información. También son útiles en una amplia variedad de otras aplicaciones, entre las que se cuenta la lectura de discos compactos y de DVD. La tecnología de Blue-ray™ ha hecho posible comercializar los DVD de alta resolución. La longitud de onda más corta de la luz azul-violeta de un láser puede leer huecos más pequeños que codifican la información digital que la luz de longitud de onda más larga. Esto ha permitido un aumento de casi seis veces en capacidad de almacenamiento de información, en comparación con los DVD convencionales, con lo cual es posible ver una película de alta definición de dos horas en un solo disco.

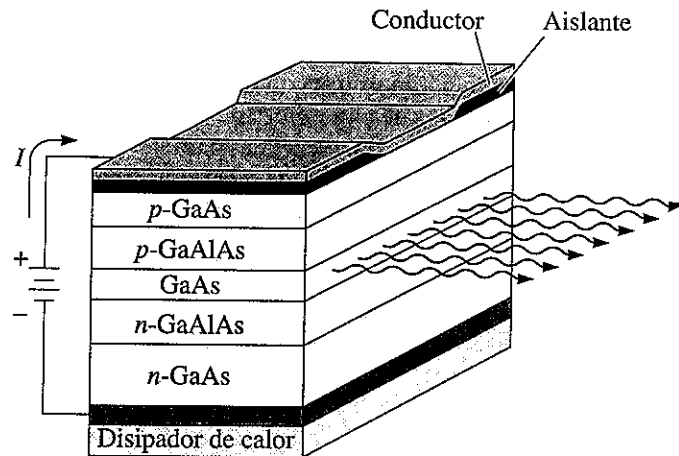
Se utilizan varios tipos de materiales para producir el láser. El rubí, que es un solo cristal de Al_2O_3 contaminado (dopado) con una pequeña cantidad de Cr_2O_3 (emite a $6943 \text{ \AA}$) y el granate de aluminio e itrio ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ YAG) contaminado con neodimio (Nd) (emite a $1.06 \mu\text{m}$) son dos láseres comunes de estado sólido. Otros láseres están basados en gas CO_2 .

También se utilizan láseres semiconductores, como los basados en soluciones sólidas de GaAs que tienen una brecha de energía correspondiente a una longitud de onda en la escala visible (figura 21-16).

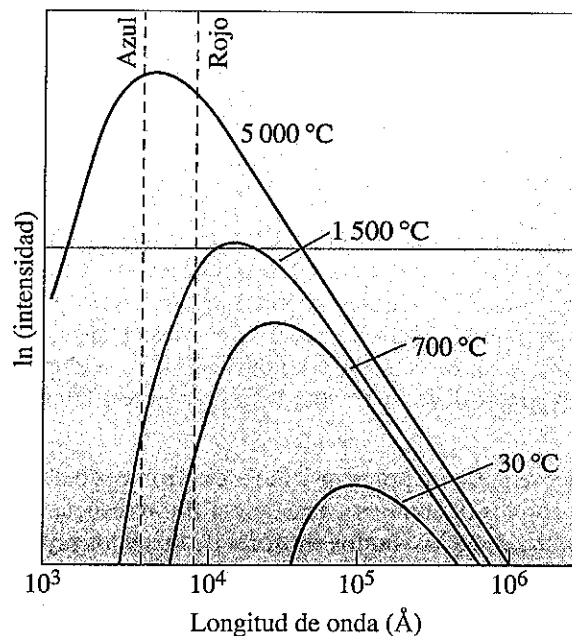
Emisión térmica

Cuando se calienta un material, los electrones se excitan térmicamente a niveles superiores de energía, en particular en los niveles de energía externos, donde los electrones están menos unidos al núcleo. Los electrones vuelven de inmediato a sus niveles normales y emiten fotones, lo cual se conoce como **emisión térmica**.

A medida que aumenta la temperatura, se incrementa la agitación térmica y aumenta la máxima energía de los fotones emitidos. Se emite un espectro de radiación continuo, con una longitud de onda mínima y una distribución de intensidad dependiente de la temperatura. Los fotones pueden incluir longitudes de onda del espectro visible; en consecuencia, el color del material cambia con la temperatura. A temperaturas bajas, los fotones emitidos tienen longitudes de onda más cortas. A 700°C , se empieza a ver un tinte rojizo; a 1500°C , se emiten longitudes de onda anaranjadas y rojas (figura 21-17). Temperaturas más altas produ-

**Figura 21-16**

Sección en corte de un láser de GaAs. Como las capas circundantes tipo *p* y tipo *n* de GaAlAs tienen una brecha de energía superior y un índice inferior de refracción al del GaAs, los fotones quedan atrapados en la capa activa del GaAs.

**Figura 21-17**

Intensidad en relación con las longitudes de onda de los fotones emitidos térmicamente desde un material. Cuando aumenta la temperatura, se emiten más fotones del espectro visible.

cen todas las longitudes de onda de la escala visible, y el espectro emitido es luz blanca. Al medir con un pirómetro la intensidad de una angosta banda de las longitudes emitidas, se puede estimar la temperatura del material.

21-5 Sistemas de comunicaciones por fibras ópticas

En 1880, Alexander Graham Bell inventó un sistema de comunicaciones basado en la luz, conocido como fotófono, y a William Wheeler se le otorgó una patente (U.S. Patente 247 229) en 1881 por un sistema que utilizaba tubos para iluminar habitaciones distantes. Estas dos invenciones fueron las predecesoras de los sistemas de comunicaciones por fibras ópticas que

existen hoy en día. La otra invención clave que ayudó a comercializar las tecnologías de fibras ópticas fue la invención del rayo láser en 1960. El láser hizo posible una fuente monocromática de luz para que las fibras ópticas pudieran usarse con eficiencia. Otro avance llegó cuando se pusieron al alcance del público las fibras de alta pureza de vidrio de sílice. Estas fibras permiten que haya muy pocas pérdidas ópticas y son esenciales para llevar información a distancias más grandes sin necesidad de equipo de repetición de señal. Las fibras ópticas también están libres de interferencia electromagnética (EMI) porque llevan señales como luz, no como ondas de radio.

Un sistema de fibras ópticas transmite una señal de luz generada desde alguna otra fuente, por ejemplo una señal eléctrica. El sistema de fibra óptica transmite la luz a un receptor usando una fibra óptica, procesa la información recibida y la convierte en una forma útil. Se requiere de materiales fotónicos para este proceso. Casi todos los principios y materiales que en la actualidad se emplean en sistemas fotónicos ya han sido introducidos en secciones anteriores.

Resumen

- Las propiedades ópticas de los materiales incluyen el índice de refracción, el coeficiente de absorción y la dispersión. Éstos se determinan por la interacción de la radiación electromagnética, es decir, de los fotones con los materiales. El índice de refracción de los materiales depende principalmente de la extensión de la polarización electrónica y, por tanto, está relacionado con la constante dieléctrica de alta frecuencia de los materiales.
- Como consecuencia de la interacción entre la luz y los materiales, puede ocurrir refracción, reflexión, transmisión, dispersión y difracción. Estos fenómenos se utilizan en una amplia diversidad de aplicaciones de los materiales fotónicos. Entre estas aplicaciones se cuentan las fibras ópticas para comunicaciones y los rayos láser para cirugía y soldadura. Los dispositivos que utilizan efectos optoelectrónicos son los LED, las celdas solares, los fotodiodos. Otras aplicaciones son fósforos para luces fluorescentes, televisores y numerosas técnicas analíticas.
- La emisión de los fotones se presenta por transiciones electrónicas o desintegración nuclear dentro de un átomo. Ejemplos de luminiscencia son la fluorescencia, la fosforescencia, la electroluminiscencia (utilizada en los diodos emisores de luz) y los rayos láser. Los fotones se emiten mediante excitación térmica, la cual produce fotones en la parte visible del espectro cuando la temperatura es suficientemente alta. En los análisis EDXA y XRF se aprovechan las emisiones de rayos X provenientes de los materiales.

Glosario

Celda solar Dispositivo de unión p - n que crea un voltaje debido a la excitación de los fotones.

Coefficiente de absorción lineal Describe la capacidad de un material para absorber radiación.

Diodos emisores de luz [LED] Dispositivos electrónicos de unión p - n que convierten una señal eléctrica en luz visible.

Dispersión Dependencia del índice de refracción en la frecuencia.

Electroluminiscencia Uso de una señal eléctrica aplicada para estimular la emisión de fotones de un material.

Emisión térmica Emisiones de fotones provenientes de un material debidas a la excitación de éste por el calor.

Espectro característico Espectro de radiación emitido por un material. Muestra picos a longitudes de onda fijas que corresponden a transiciones electrónicas dentro de un átomo. Todo elemento tiene un espectro característico único.

Espectro continuo Radiación emitida por un material con todas las longitudes de onda más largas que un límite crítico de longitud de onda corta.

Fluorescencia Emisión de luz que normalmente se obtiene en menos de $\sim 10^{-8}$ segundos.

Fosforescencia Emisión de radiaciones proveniente de un material después de haberse eliminado el estímulo.

Fotoconducción Producción de un voltaje debido a la estimulación de electrones hacia la banda de conducción, impulsados por una radiación.

Fotones Energía o radiación producida por fuentes atómicas, nucleares o electrónicas y que pueden ser tratadas como partículas o como ondas.

Índice de refracción Se relaciona con el cambio en velocidad y dirección de propagación de la radiación, al pasar esta radiación por un medio transparente (también conocido como índice refractivo).

Índice refractivo Véase Índice de refracción.

Láser El acrónimo significa amplificación de luz por emisión estimulada de radiaciones. Es un haz de radiación coherente monocromática producida por la emisión controlada de fotones.

Límite de longitud de onda corta Es la longitud de onda más corta o radiación más alta de energía desde un material bajo condiciones especiales.

Luminiscencia Conversión de radiaciones en luz visible.

Margen de absorción Longitud de onda a la cual cambian de manera abrupta las características de absorción de un material.

Rayos x Radiación electromagnética en la escala de longitudes de onda ~ 0.1 a $100 \text{ \AA}$.

Reflectividad Porcentaje de la radiación incidente que se refleja.

Tiempo de relajación Tiempo requerido para que $1/e$ de los electrones baje de la banda de conducción a la banda de valencias en la luminiscencia.

Problemas

Sección 21-1 El espectro electromagnético

Sección 21-2 Refracción, reflexión, absorción y transmisión

- 21-1** Expresé las definiciones de índice de refracción y de coeficiente de absorción. Compárelas con las definiciones de constante dieléctrica, factor de pérdida, módulo de Young y deformación viscosa.
- 21-2** ¿Qué es la ley de Snell? Ilustre usando un diagrama.
- 21-3** ¿De qué depende el índice de refracción de un material?
- 21-4** ¿Qué es un "cristal de plomo"? ¿Qué es lo que hace que el índice de refracción de este material sea mucho más elevado que el del vidrio de silicato común?

- 21-5** ¿Qué mecanismo de polarización afecta al índice de refracción?
- 21-6** ¿Por qué es menor el índice de refracción del hielo que el del agua?
- 21-7** ¿Qué es dispersión? ¿Cuál es la importancia de la dispersión en los sistemas de fibras ópticas?
- 21-8** ¿Cuáles son los factores que limitan la transmisión de luz a través de materiales dieléctricos?
- 21-9** ¿Cuál es el principio de operación de los LED y de las celdas solares?
- 21-10** Un rayo de fotones incide sobre un material a un ángulo de 25° con respecto a la normal de la superficie. ¿Cuáles de los materiales de la lista de la tabla 21-1, si hay alguno, podría hacer que el rayo de fotones avance en un ángulo de 18 a 20° con respecto a la normal de la superficie del material?

- 21-11** Un rayo láser que pasa por el aire incide sobre un bloque de poliestireno de 5 cm de espesor a un ángulo de 20° con respecto a la normal del bloque. ¿En qué distancia cambiará de lugar el rayo, con respecto a su trayectoria original cuando alcance el lado opuesto del bloque?
- 21-12** Un cable de fibra óptica de 6000 kilómetros se tiende para conectar las ciudades de Nueva York y Londres. Si el núcleo del cable tiene un índice refractivo de 1.48 y el revestimiento tiene un índice refractivo de 1.45, ¿cuál es el tiempo necesario para que un haz de fotones introducido a 0° en Nueva York llegue a Londres? Suponga que los efectos de dispersión pueden ser insignificantes para este cálculo. ¿Cuál es el máximo ángulo de incidencia al cual no hay fuga de luz desde el núcleo?
- 21-13** Un bloque de vidrio de 10 cm de grueso con $n = 1.5$ transmite 90% de la luz que incide sobre él. Determine el coeficiente de absorción lineal (α) para este material. Si este bloque se coloca en agua, ¿qué parte de la luz incidente será transmitida a través del bloque?
- 21-14** Un haz de fotones pasa por el aire e incide sobre un vidrio de sosa y cal que es parte de un acuario que contiene agua. ¿Qué parte del haz es reflejado por la cara anterior del vidrio? ¿Qué parte del haz restante es reflejado por la cara posterior del vidrio?
- 21-15** Se encuentra que 20% de la intensidad original de un haz de fotones se transmite desde el aire a través de un material de 1 cm de grueso, con una constante dieléctrica de 2.3, y luego regresa al aire. Determine la fracción del haz que
- es reflejado en la superficie anterior,
 - es absorbido en el material y
 - es reflejado en la superficie posterior.
- Determine el coeficiente de absorción lineal de los fotones en el material.
- 21-16** Un haz de fotones en el aire incide sobre un material compuesto, formado por una hoja de 1 cm de grueso de polietileno y una hoja de 2 cm de grueso de vidrio de cal y sosa. El haz incidente forma un ángulo de 10° con la normal del material compuesto. Determine el

ángulo del haz con respecto a la normal del compuesto cuando

- pasa por el polietileno,
- pasa por el vidrio y
- pasa por aire en el lado opuesto del compuesto.

¿En qué distancia se habrá desplazado el haz de su trayectoria original cuando emerge del lado opuesto del material compuesto?

- 21-17** Una fibra de vidrio ($n = 1.5$) está recubierta con teflón. Calcule el ángulo máximo en que se puede desviar un haz de luz, en relación con el eje de la fibra, sin escapar de la parte interna de la fibra.

- 21-18** Un material tiene un coeficiente de absorción lineal de 591 cm^{-1} para fotones de una longitud de onda en particular. Determine el espesor del material necesario para absorber el 99.9% de los fotones.

Sección 21-3 Absorción, transmisión o reflexión selectivas

- 21-19** ¿Qué es un vidrio fotocromático?
- 21-20** ¿Cómo se producen los vidrios de color?
- 21-21** ¿De qué está hecho el cristal de rubí?

Sección 21-4 Ejemplos y usos de fenómenos de emisión

- 21-22** ¿Cuál es el principio de operación del análisis por dispersión de energía de rayos x (EDXA)?
- 21-23** ¿Qué es fluorescencia? ¿Qué es fosforescencia?
- 21-24** ¿Qué significa XRF?
- 21-25** ¿Cómo funciona una lámpara fluorescente?
- 21-26** ¿Qué es electroluminiscencia?
- 21-27** Un microscopio electrónico de barrido tiene tres posiciones para el voltaje de aceleración a) 5 keV, b) 10 keV y c) 20 keV. Determine la posición de barrido mínimo necesario para producir K_α picos para los materiales citados en la tabla 21-2.
- 21-28** El tiempo de relajación de un fósforo empleado para una pantalla de TV es de 5×10^{-2} segundos. Si la frecuencia de regeneración de la imagen es de 60 Hz, entonces ¿cuál es la reducción en intensidad de la luminis-

cencia antes que se restablezca al 100% por la regeneración?

- 21-29** El tungstato de calcio (CaWO_4) tiene un tiempo de relajación de 4×10^{-6} segundos. Determine el tiempo necesario para que la intensidad de este material fosforescente disminuya a 1% de la intensidad original, después de eliminar el estímulo.
- 21-30** La intensidad de la radiación proveniente de un material fosforescente disminuye al 90% de su intensidad original después de 1.95×10^{-7} segundos. Determine el tiempo necesario para que la intensidad se reduzca al 1% de su intensidad original.
- 21-31** Un material de fósforo con una brecha de banda de 3.5 eV, con grado apropiado de impurificación, se utilizará para producir colores azul (475 nm) y verde (510 nm). Determine el nivel de energía de las trampas donadoras con respecto a la banda de conducción en cada caso.
- 21-32** ¿Qué es un láser?
- 21-33** Determine la longitud de onda de los fotones que se producen cuando los electrones excitados hacia la banda de conducción del silicio contaminado con indio:
- bajan de la banda de conducción hacia la banda del aceptante y
 - después bajan de la banda del aceptante hasta la banda de valencia (véase el capítulo 19).
- 21-34** ¿Cuáles, si los hay, de los materiales semiconductores compuestos, de la lista de los capítulos 19 y 21, son capaces de producir un rayo láser infrarrojo?
- 21-35** ¿Qué tipo de radiación electromagnética (ultravioleta, infrarroja, visible) se produce cuando un electrón se recombina con un orificio en germanio puro y cuál es su longitud de onda?
- 21-36** ¿Cuáles, si los hay, de los materiales dieléctricos citados en el capítulo 19, reducirían la velocidad de la luz en aire de 3×10^{10} cm/s a menos de 0.5×10^{10} cm/s?
- 21-37** ¿Qué material filtrante utilizaría usted para aislar el pico K_α de los siguientes rayos x: hierro, manganeso o níquel? Explique su respuesta.

- 21-38** ¿Qué voltaje debe ser aplicado a un filamento de tungsteno para producir un espectro continuo de rayos x con una longitud de onda mínima de 0.09 nm?
- 21-39** Un filamento de tungsteno es calentado por una fuente de alimentación de 12 400 V. ¿Cuál es
- la longitud de onda y
 - la frecuencia de los rayos x de más alta energía que se producen?
- 21-40** ¿Cuál es el voltaje mínimo acelerador necesario para producir rayos x K_α en níquel?
- 21-41** Con base en los rayos x característicos emitidos, determine la diferencia en energía entre los electrones en el tungsteno para
- las capas K y L
 - las capas K y M y
 - las capas L y M .
- 21-42** La figura 21-18 muestra los resultados de un análisis de rayos x fluorescentes, en el que la energía de los rayos x emitidos por el material se trazan en función de sus longitudes de onda. Determine
- el voltaje acelerador empleado para producir los rayos x de excitación y
 - la identidad de los elementos de la muestra.

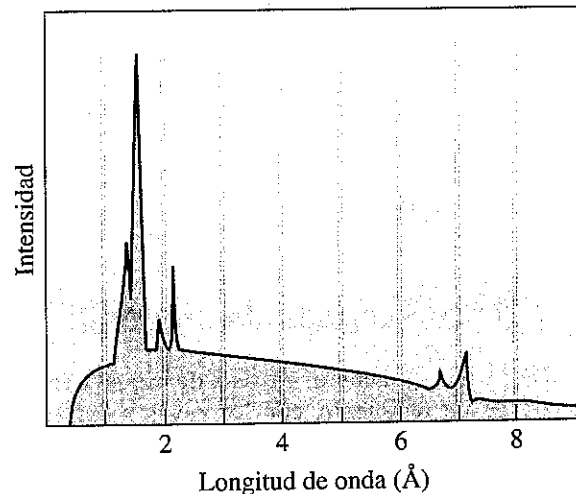


Figura 21-18 Resultados de un análisis por fluorescencia de rayos x de una muestra de un metal desconocido (para el problema 21-42).

- 21-43** La figura 21-19 muestra la intensidad como función de energía de rayos x, producidos por un análisis dispersivo de energía de un espécimen en un microscopio electrónico de barrido. Determine la intensidad de los elementos de la muestra.

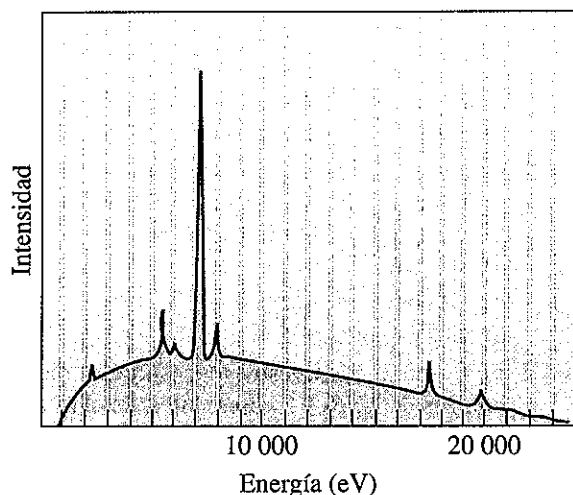


Figura 21-19 Espectro de emisión de rayos x (para el problema 21-43).

Sección 21-5 Sistemas de comunicaciones por fibras ópticas

- 21-44** ¿Cuál es el principio por el cual se transmite la información por fibra óptica?
- 21-45** ¿Cuál es el material que se usa para la fabricación de la mayor parte de las fibras ópticas? ¿De qué material es el recubrimiento? ¿Qué material se utiliza para mejorar el índice refractivo del núcleo?



Problemas de diseño

- 21-46** Se han de generar rayos x de níquel dentro de un recipiente, con los rayos x emitidos desde el recipiente a través de sólo una ranura. Diseñe un recipiente que asegure que no más del 0.01% de la emisión de rayos x del níquel K_α escapen por el resto de las paredes del recipiente, pero que 95% de los rayos x del níquel K_α pasen por una delgada ventana que cubra la ranura. Los siguientes datos dan los coeficientes de absorción de

masa de varios metales, para rayos x del níquel K_α . El coeficiente de absorción de masa α_m es α/ρ , donde α es el coeficiente de absorción lineal de masa y ρ es la densidad del material filtrante.

Material	α_m (cm ² /g)
Be	1.8
Al	58.4
Ti	247.0
Fe	354.0
Co	54.4
Cu	65.0
Sn	322.0
Ta	200.0
Pb	294.0

- 21-47** Diseñe un método mediante el cual se pueda utilizar un material fotoconductor, para medir la temperatura de un material, partiendo de la emisión térmica del material.
- 21-48** Diseñe un método, basado en las características refractivas de un material, que harán que un haz de fotones originalmente a un ángulo de 2° con respecto a la normal del material, se desplace 2 cm de su trayectoria original a una distancia de 50 cm del material.
- 21-49** En las máquinas fotocopadoras se utiliza selenio amorfo. Realice una investigación de información y averigüe el modo en que el selenio amorfo funciona en esta aplicación.



Problemas de cómputo

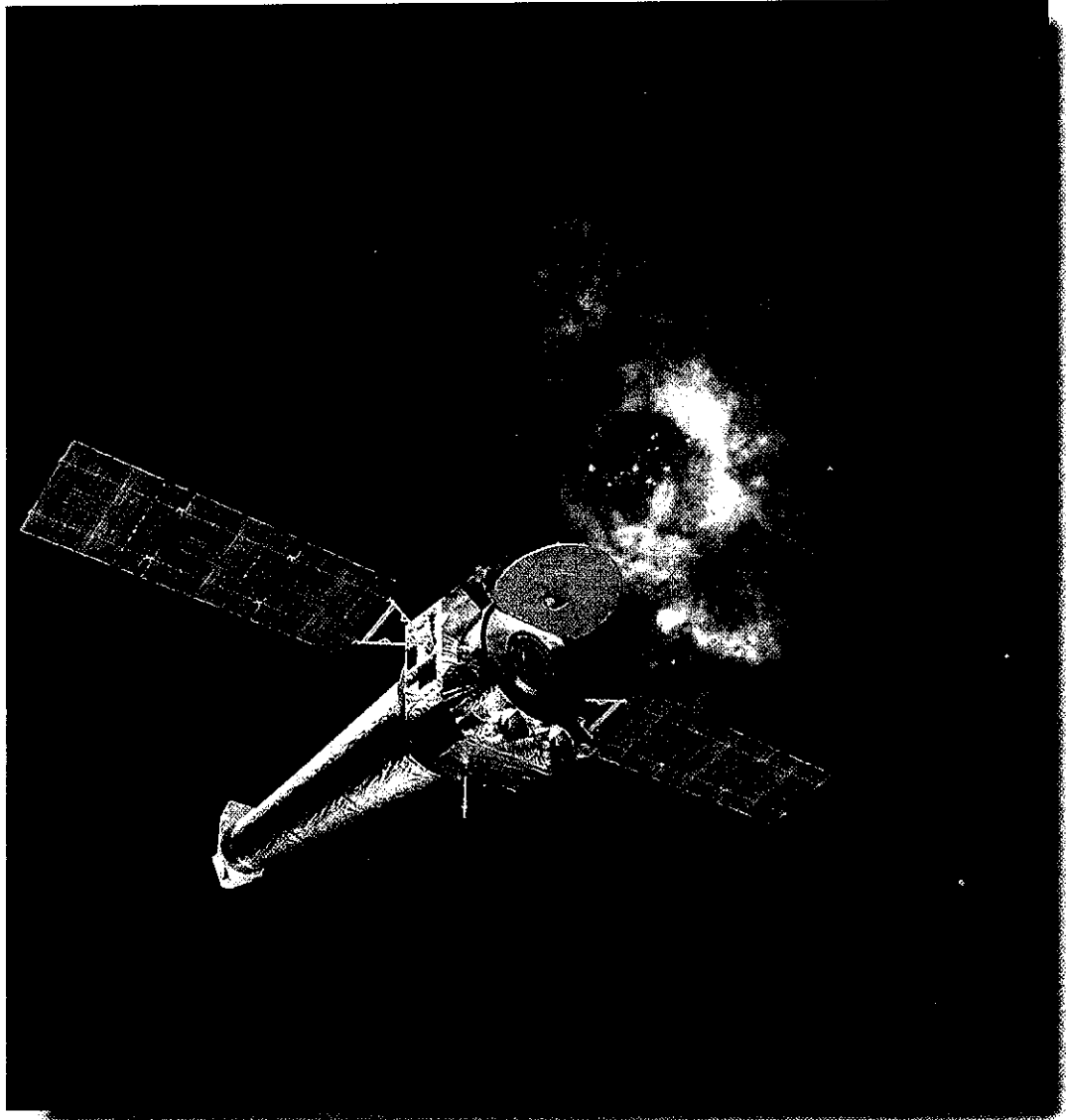
- 21-50** *Cálculo de la potencia en decibels.* En un sistema óptico de comunicaciones, o en un sistema de transmisión de energía eléctrica, la energía o señal se transfiere con frecuencia entre varios componentes. El decibel (dB) es una unidad práctica para medir los niveles relativos de la potencia. Si la potencia de entrada a un dispositivo es P_1 y la potencia de salida es P_2 , entonces P_2/P_1 es la relación de potencia transmitida y representa la eficiencia. Esta relación en decibels se escribe como

$$\text{dB} = 10 \log \frac{P_2}{P_1}$$

La potencia debe expresarse en unidades similares. Escriba un programa de computadora que calcule el valor en dB para la transmisión de energía entre dos componentes de un sistema de fibras ópticas (por ejemplo, de la fuente luminosa a la fibra). Después amplíe este cálculo para tres componentes (por ejemplo luz transmitida de la fuente a la fibra y después de la fibra a un detector).

Knovel® Problema

- K21-1** Un rayo de luz pasa por benceno a vidrio (dióxido de silicio). El ángulo de incidencia de la luz es de 30° . ¿Cuál es el ángulo de la luz refractada?
- K21-2** Calcule la reflectividad del mercurio en aire a partir del índice de refracción n .



Las propiedades térmicas de materiales desempeñan una muy importante función en numerosas tecnologías. De los refractarios utilizados en la producción de materiales metálicos a los recubrimientos de barreras térmicas (RBT) para álabes de turbinas, muchas aplicaciones requieren materiales que reduzcan al mínimo la transferencia de calor. El manejo térmico es de capital importancia en la industria microelectrónica. Algunos chips de memoria de computadoras tienen ahora más de mil millones de transistores; el calor que se genera debe ser disipado de manera eficiente para que los dispositivos funcionen en forma apropiada.

La expansión térmica de materiales también desempeña un papel clave en muchas situaciones; esta expansión puede llevar a que se produzcan esfuerzos que conducen a falla de materiales. Científicos e ingenieros especialistas en materiales han creado novedosas clases de éstos que tienen un coeficiente de expansión térmica negativo o casi cero. Ésta es una característica importante en materiales ópticos como los que se usan en espejos para telescopios, porque el enfoque de los espejos cambia según la expansión y contracción térmicas. Esta fotografía muestra una interpretación artística del telescopio Chandra de Rayos x. Los sustratos del espejo de los telescopios Chandra y Hubble de la NASA han sido contruidos de un material vidrio-cerámica conocido como Zerodur™, manufacturado por Schott Glass Technologies; obsérvense también los paneles solares. Zerodur™ es sólo uno de los innumerables ejemplos de cómo la ciencia e ingeniería de materiales han tenido impacto en otras disciplinas, creando así conocimientos y beneficios para la sociedad. (Imagen cortesía de la NASA.)

Propiedades térmicas de los materiales

¿Se ha preguntado alguna vez?

- ¿Cuál material tiene la conductividad térmica más alta?
- ¿Hay materiales que tienen coeficientes de expansión térmica cero o negativa?
- ¿Qué material se usa para construir el sustrato del espejo del telescopio de rayos x Chandra?
- ¿Qué materiales se usan para proteger el transbordador espacial contra altas o bajas temperaturas extremas?

En capítulos anteriores, se describió la forma en que las propiedades de un material pueden cambiar con la temperatura. En muchos casos, se encuentra que las propiedades mecánicas y físicas de un material dependen de la temperatura de servicio o de procesamiento. Es útil una apreciación de las propiedades térmicas de materiales para entender la falla mecánica de materiales cuando cambia la temperatura, para diseñar procesos en los que los materiales deban calentarse o para seleccionar materiales para transferir rápidamente el calor.

El manejo térmico se ha convertido en un factor muy importante en materiales de empaques electrónicos. Algunos chips de memoria para computadoras tienen ahora más de mil millones de transistores; el calor que se produce debe ser disipado de manera eficiente para que los dispositivos funcionen en forma apropiada.

En materiales metálicos, los electrones transfieren calor; en materiales cerámicos, la conducción de calor abarca las partículas cuánticas llamadas fonones. En ciertas otras aplicaciones, por ejemplo los recubrimientos térmicos de barreras o losetas del transbordador espacial, se desea reducir al mínimo la transferencia térmica a través del material. La transferencia térmica también es importante en numerosas aplicaciones que van, por ejemplo, de vasos de espuma de poliestireno que se usan para tomar bebidas calientes hasta refinados recubrimientos en vidrios para la construcción de edificios eficientes en el consumo de energía. En este capítulo se estudiará la capacidad térmica, las propiedades de expansión térmica y la conductividad térmica de materiales.

22-1 Capacidad térmica y calor específico

En el capítulo 21 se observó que el comportamiento óptico depende de la forma en que se producen e interactúan los fotones con un material. El fotón es tratado como partícula con una energía particular o como radiación electromagnética que tiene una longitud de onda o frecuencia particulares. Algunas de las propiedades térmicas de los materiales también pueden caracterizarse en la misma forma dual, pero estas propiedades son determinadas por el comportamiento de los **fonones**, no de los fotones.

En el cero absoluto, los átomos en un material tienen una mínima energía. Cuando se les aplica calor, los átomos ganan energía térmica y vibran a una amplitud y frecuencia particulares. La vibración de cada átomo se transfiere a los átomos circundantes y produce una onda elástica llamada fonón. La energía E del fonón se puede expresar en términos de la longitud de onda donde h es la constante de Planck y c es la velocidad de la luz o frecuencia ν , igual que en la ecuación 21-1:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = h\nu \quad (22-1)$$

La energía necesaria para cambiar en un grado la temperatura del material es la **capacidad calorífica** o **calor específico**.

La capacidad calorífica es la energía necesaria para elevar, en un grado, la temperatura de un mol de material. El calor específico se define como la energía necesaria para aumentar, en 1 °C, la temperatura de un gramo de un material. La capacidad calorífica se puede expresar ya sea a temperatura constante, C_p , o a un volumen constante, C_v . A temperaturas elevadas, la capacidad calorífica para un volumen determinado de material se aproxima a

$$C_p = 3R \approx 6 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \quad (22-2)$$

donde R es la constante de los gases (1.987 cal/mol); no obstante, como se muestra en la figura 22-1, la capacidad calorífica no es una constante. La capacidad calorífica de metales se aproxima a $6 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ cerca de la temperatura ambiente, pero este valor no se alcanza en materiales cerámicos sino hasta que se acerca a los 1000 K.

La relación entre calor específico y capacidad calorífica es

$$\text{Calor específico} = C_p = \frac{\text{capacidad calorífica}}{\text{peso atómico}} \quad (22-3)$$

En la mayor parte de cálculos de ingeniería, el calor específico se usa en forma más práctica que la capacidad calorífica. El calor específico de materiales comunes se da en la tabla 22-1.

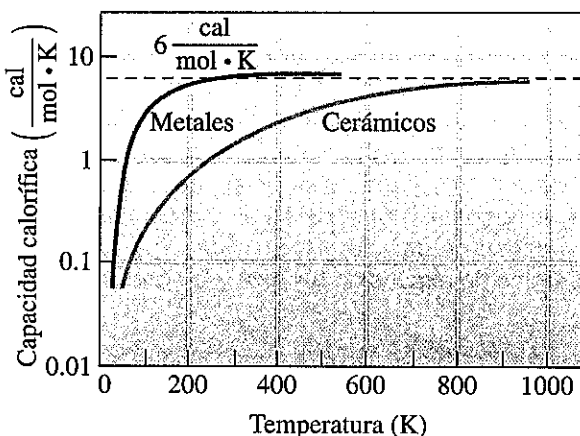


Figura 22-1
Capacidad calorífica como función de la temperatura para metales y materiales cerámicos.

TABLA 22-1 ■ Calor específico de materiales seleccionados a 300 K

Calor específico		Calor específico	
Material	$\left(\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{K}}\right)$	Material	$\left(\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{K}}\right)$
Metales		Cerámicos	
Al	0.215	Al ₂ O ₃	0.200
Cu	0.092	Diamante	0.124
B	0.245	SiC	0.250
Fe	0.106	Si ₃ N ₄	0.170
Pb	0.038	SiO ₂ (sílice)	0.265
Mg	0.243	Polímeros	
Ni	0.106	Polietileno de alta densidad	0.440
Si	0.168	Polietileno de baja densidad	0.550
Ti	0.125	Nylon 6,6	0.400
W	0.032	Poliestireno	0.280
Zn	0.093	Otros	
		Agua	1.000
		Nitrógeno	0.249

Nota: $1 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{K}} = 4184 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Ni la capacidad calorífica ni el calor específico dependen de manera significativa de la estructura del material; por tanto, los cambios en densidad de las dislocaciones, el tamaño de grano o las vacancias tienen poco efecto.

El factor más importante que afecta al calor específico es el de vibraciones de la red o fonones, pero hay otros factores que afectan la capacidad calorífica. Un sorprendente ejemplo se presenta en materiales ferromagnéticos tales como el hierro (figura 22-2). Se observa una capacidad calorífica anormalmente elevada en el hierro a la temperatura de Curie, donde los momentos magnéticos normalmente alineados de los átomos de hierro se dispersan al azar y el hierro se hace paramagnético. La capacidad calorífica también depende de la estructura cristalina, como se ve en la figura 22-2 para el hierro.

Los ejemplos siguientes ilustran el uso del calor específico.

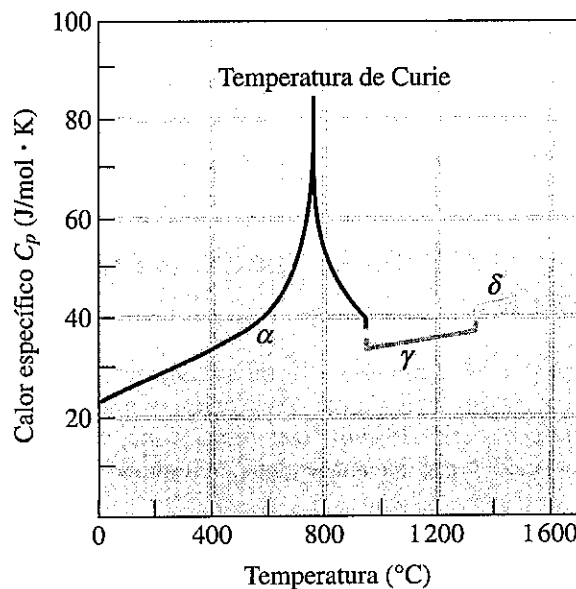


Figura 22-2
Efecto de la temperatura en el calor específico del hierro. Aparecen indicados el cambio en estructura cristalina y el cambio en comportamiento de ferromagnético a paramagnético.

Ejemplo 22-1**Calor específico del tungsteno**

¿Cuánto calor debe aplicarse a 250 g de tungsteno para elevar su temperatura de 25 a 650 °C?

SOLUCIÓN

El calor específico del tungsteno es $0.032 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{K}}$. Entonces,

$$\begin{aligned}\text{Calor requerido} &= (\text{calor específico})(\text{masa})(\Delta T) \\ &= (0.032 \text{ cal/g} \cdot \text{K})(250 \text{ g})(650 - 25) \\ &= 5\,000 \text{ cal}\end{aligned}$$

Si no hay pérdidas, al tungsteno deben aplicarse 5 000 calorías (o 20 920 J). Pueden usarse diversos procesos para calentar el metal. Se podría usar un soplete, poner el tungsteno en una bobina de inducción para inducir corrientes parásitas, pasar una corriente eléctrica por el metal o colocar el metal en un horno calentado por resistores de SiC.

Ejemplo 22-2**Calor específico del niobio**

Suponga que la temperatura de 50 g de niobio aumenta 75 °C cuando se calienta. Estime el calor específico y determine el calor en calorías requeridas.

SOLUCIÓN

El peso atómico del niobio es de 92.91 g/mol. Se puede usar la ecuación 22-3 para estimar el calor necesario para elevar, en 1 °C, la temperatura de un gramo.

$$C_p \approx \frac{6}{92.91} = 0.0646 \text{ cal/(g} \cdot \text{°C)}$$

Entonces, el total de calor necesario es

$$\text{Calor} = \left(0.0646 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{°C}}\right)(50 \text{ g})(75 \text{ °C}) = 242 \text{ cal}$$

Nótese que el cambio de 1 °C en temperatura es equivalente a un cambio de 1 K en la temperatura.

22-2 Expansión térmica

Un átomo que gana energía térmica y empieza a vibrar se comporta como si tuviera un radio atómico más grande; aumenta la distancia promedio entre los átomos y por tanto se incrementan las dimensiones totales del material. El cambio en dimensiones del material Δl por unidad de longitud está dado por el **coeficiente lineal de expansión térmica** α :

$$\alpha = \frac{l_f - l_0}{l_0(T_f - T_0)} = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T} \quad (22-4)$$

TABLA 22-2 ■ Coeficiente lineal de expansión térmica, a temperatura ambiente, para materiales seleccionados

Material	Coeficiente lineal de expansión térmica (α) ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	Material	Coeficiente lineal de expansión térmica (α) ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
Al	25.0	Nylon 6,6	80.0
Cu	16.6	Nylon 6,6-33% de fibra de vidrio	20.0
Fe	12.0	Polietileno	100.0
Ni	13.0	Polietileno-30% de fibra de vidrio	48.0
Pb	29.0	Poliestireno	70.0
Si	3.0	Al_2O_3	6.7
W	4.5	Sílice fundida	0.55
Acero 1020	12.0	ZrO_2 parcialmente estabilizada	10.6
Aleación de aluminio 3003	23.2	SiC	4.3
Fundición de hierro gris	12.0	Si_3N_4	3.3
Invar (Fe-36% Ni)	1.54	Vidrio de sosa y cal	9.0
Acero inoxidable	17.3		
Latón amarillo	18.9		
Epoxi	55.0		

donde T_0 y T_f son las temperaturas inicial y final y l_0 y l_f son las dimensiones inicial y final del material. Un coeficiente *volumétrico* de expansión térmica (α_v) también puede definirse para describir el cambio en volumen cuando se cambia la temperatura del material. Si el material es isótropo, $\alpha_v = 3\alpha$. Se utiliza un instrumento conocido como dilatómetro para medir el coeficiente de expansión térmica. También es posible determinar la expansión térmica si se usa la difracción de rayos x (XRD). En la tabla 22-2 aparecen los coeficientes de expansión térmica para varios materiales.

El coeficiente de expansión térmica de un material está relacionado con el enlace atómico. Para que los átomos vibren alrededor de sus posiciones de equilibrio, debe aplicarse energía al material. Si el pozo de potencial es asimétrico, los átomos se separan más con mayor energía en comparación con un pozo simétrico, y el material tiene un elevado coeficiente de expansión térmica (capítulo 2). El coeficiente de expansión térmica también tiende a ser inversamente proporcional a la profundidad del pozo de potencial, es decir, los materiales con altas temperaturas de fusión tienen coeficientes de expansión térmica bajos (figura 22-3).

En consecuencia, el plomo (Pb) tiene un coeficiente mucho mayor que los metales con alto punto de fusión como el tungsteno (W). La mayor parte de los materiales cerámicos, que tienen fuertes enlaces iónicos o covalentes, tienen bajos coeficientes en comparación con los metales. Ciertos vidrios, por ejemplo la sílice fundida, también tienen un bajo factor de empaquetamiento, lo que ayuda a acomodar energía térmica con poco daño dimensional. Aun cuando el enlace dentro de las cadenas de polímeros es covalente, los enlaces secundarios que mantienen juntas las cadenas son débiles, lo cual lleva a coeficientes altos. Los polímeros que contienen fuertes enlaces cruzados por lo general tienen coeficientes más bajos que los polímeros lineales como el polietileno.

Deben tomarse algunas precauciones al calcular los cambios dimensionales en los materiales:

1. Las características de expansión de algunos materiales, en particular de monocristales y de materiales con una orientación preferida, son anisótropos.
2. Los materiales alotrópicos tienen abruptos cambios en sus dimensiones cuando se presenta la transformación de fase (figura 22-4). Estos abruptos cambios contribuyen al agrietamiento de refractarios al calentarse o enfriarse y grietas de templeado en aceros.

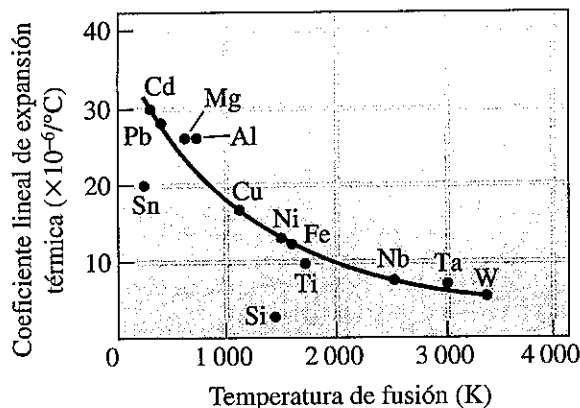


Figura 22-3

Relación entre el coeficiente lineal de expansión y la temperatura de fusión en metales a 25 °C. Los metales con punto de fusión más alto tienden a expandirse en menor grado.

3. El coeficiente lineal de expansión cambia de manera continua con la temperatura. Normalmente, α aparece en manuales como una complicada función dependiente de la temperatura, o se da como constante para sólo una escala particular de temperatura.
4. La interacción del material con campos eléctricos o magnéticos, producidos por dominios magnéticos, puede impedir la expansión normal hasta que se alcancen temperaturas superiores a la temperatura de Curie. Éste es el caso del Invar, que es una aleación de Fe-36% Ni, que prácticamente no experimenta cambios dimensionales a temperaturas inferiores a la temperatura de Curie (unos 200 °C). Esto hace que el Invar sea atractivo como material para materiales bimetálicos (figura 22-4).

La expansión térmica de los materiales de ingeniería se puede adaptar si se utilizan materiales de fases múltiples. Al calentarse, una fase puede mostrar expansión térmica en tanto que la otra fase puede mostrar contracción térmica. De esta forma, el material general puede mostrar un coeficiente de expansión térmica igual a cero o negativo. El Zerodur™ es un material vidrio-cerámico que puede ser controlado para que tenga una expansión térmica igual a cero o ligeramente negativa. Fue inventado por Schott Glass Technologies y está formado por una fase cristalina ~70 a 80% en peso. El resto es una fase vítrea. El coeficiente de expansión térmica negativa de la fase vítrea y la expansión térmica positiva de la fase cristalina se cancelan, lo cual lleva a un material de expansión térmica igual a cero. El Zerodur™ se ha utilizado

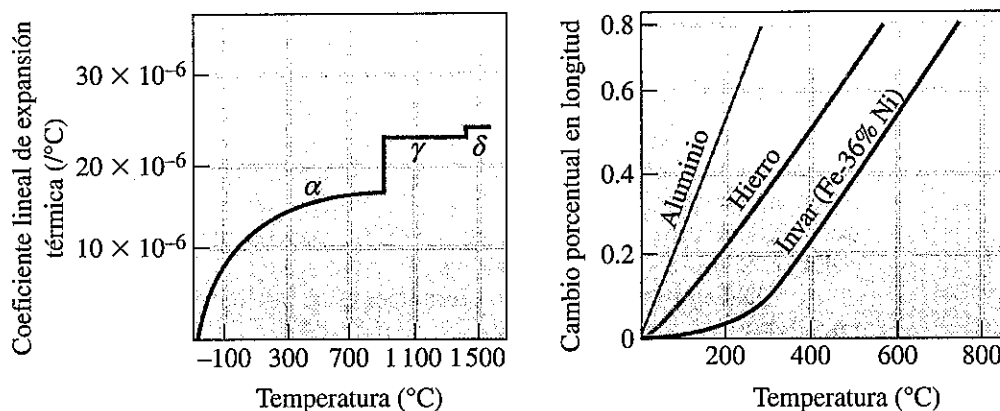


Figura 22-4 a) El coeficiente lineal de expansión térmica del hierro cambia de manera abrupta a temperaturas donde se presenta una transformación alotrópica. b) La expansión del Invar es muy baja debido a las propiedades magnéticas del material a temperaturas bajas.

como sustrato del espejo del telescopio Hubble y del telescopio de rayos x Chandra. En estas aplicaciones, es necesario un material denso, ópticamente transparente y de expansión térmica igual a cero, porque cualquier cambio en dimensiones como resultado de cambios en la temperatura en el espacio haría difícil enfocar los telescopios en forma apropiada. El Zerodur™ es un ejemplo de la forma en que los materiales de ingeniería han ayudado a astrónomos y a la sociedad a conocer galaxias lejanas. Numerosos materiales cerámicos basados en fosfato de sodio y zirconio (NZP), que tienen un coeficiente de expansión térmica casi igual a cero, también han sido perfeccionados por científicos especialistas en materiales.

Los ejemplos siguientes muestran el uso de los coeficientes lineales de expansión térmica.

Ejemplo 22-3

Enlaces y expansión térmica

Explique por qué, en la figura 22-3, los coeficientes lineales de expansión térmica para el silicio y el estaño no caen en la curva. ¿Cómo se esperaría que el germanio se ajustara en esta figura?

SOLUCIÓN

Tanto el silicio como el estaño tienen enlaces covalentes. Estos fuertes enlaces covalentes son más difíciles de estirar que los enlaces metálicos (un valle más profundo en la curva de separación de energía), de modo que estos elementos tienen un coeficiente más bajo. Como el germanio también está ligado de manera covalente, su expansión térmica debe ser menor que la pronosticada por la figura 22-3.

Ejemplo 22-4

Diseño de un molde para un proceso de colado

Diseñe las dimensiones para un modelo que se usará para producir una pieza de aluminio colada de forma rectangular que tenga dimensiones de $25 \times 25 \times 3$ cm a 25°C .

SOLUCIÓN

Para producir una pieza colada que tenga dimensiones finales particulares, la cavidad del molde en el que el aluminio líquido se ha de vaciar debe ser de mayor tamaño. Después de que el líquido se solidifica, lo cual ocurre a 660°C para el aluminio puro, la pieza colada sólida se contrae a medida que se enfría a temperatura ambiente. Si se calcula la cantidad de contracción esperada, es posible fabricar el molde original para producir la cavidad del molde con el tamaño más grande requerido.

El coeficiente lineal de expansión térmica para el aluminio es $25 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$. El cambio de temperatura desde la temperatura de solidificación a 25°C es $660 - 25 = 635^\circ\text{C}$. El cambio en cualquier dimensión está dado por

$$\Delta l = l_0 - l_f = \alpha l_0 \Delta T$$

Para las dimensiones de 25 cm, $l_f = 25$ cm. Se desea hallar l_0 :

$$l_0 - 25 = (25 \times 10^{-6})(l_0)(635)$$

$$l_0 - 25 = 0.015875 l_0$$

$$0.984 l_0 = 25$$

$$l_0 = 25.40 \text{ cm}$$

Para la dimensión de 3 cm, $l_f = 3$ cm,

$$l_0 - 3 = (25 \times 10^{-6})(l_0)(635)$$

$$l_0 - 3 = 0.015875l_0$$

$$0.984l_0 = 3$$

$$l_0 = 3.05 \text{ cm}$$

Si se diseña el molde con las dimensiones $25.40 \times 25.40 \times 3.05$ cm, la pieza colada se contraerá a las dimensiones requeridas.

Cuando un material isótropo se calienta en forma lenta y uniforme, el material se expande de manera uniforme sin crear esfuerzos residuales. No obstante, si el material está restringido, los cambios dimensionales pueden no ser posibles y, en cambio, se forman esfuerzos. Estos **esfuerzos térmicos** están relacionados con el coeficiente de expansión térmica, el módulo de elasticidad E del material, y el cambio de temperatura ΔT :

$$\sigma_{\text{térmico}} = \alpha E \Delta T \quad (22-5)$$

Los esfuerzos térmicos pueden aparecer por varias fuentes. En estructuras rígidas grandes por ejemplo puentes, las restricciones pueden aparecer como resultado del diseño. Algunos puentes se diseñan en secciones con placas de acero entre secciones, de modo que las secciones se mueven una con respecto a otra durante cambios de temperatura estacionales.

Cuando se unen materiales, por ejemplo al recubrir tinas de baño de hierro fundido con un esmalte cerámico o al recubrir álabes de superaleaciones para turbinas, con una barrera térmica de zirconio estabilizado con itrio (YSZ), los cambios en temperatura causan diferentes cantidades de contracción o expansión en los distintos materiales. Esta disparidad lleva a esfuerzos térmicos que pueden ocasionar que el recubrimiento protector se desconche. Es necesario un cuidadoso ajuste para igualar las propiedades térmicas del recubrimiento con las del material del sustrato, para evitar grietas (si el coeficiente del recubrimiento es menor que el del sustrato base) o el desconchado (desprendimiento del recubrimiento debido a un elevado coeficiente de expansión).

Puede presentarse una situación similar en materiales compuestos. Las fibras frágiles que tienen un menor coeficiente que la matriz pueden estirarse hasta el punto de ruptura cuando aumenta la temperatura del compuesto.

Los esfuerzos térmicos pueden aparecer incluso en un material isótropo no rígido si la temperatura no es uniforme. Al fabricar vidrio templado (capítulo 15), la superficie se enfría con más rapidez que el centro, lo cual permite que la superficie se contraiga inicialmente. Cuando el centro se enfría después, su contracción es restringida por la superficie rígida, ocasionando esfuerzos residuales en la superficie.

Ejemplo 22-5

Diseño de un recubrimiento protector

Se ha de aplicar un esmalte cerámico a una placa de acero 1020. La cerámica tiene una resistencia de 4000 psi a la fractura, un módulo de elasticidad de 15×10^6 psi, y un coeficiente de expansión térmica de $10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Diseñe el cambio máximo de temperatura que pueda permitirse sin agrietamiento de la cerámica.

SOLUCIÓN

Debido a que el esmalte queda unido al acero 1020, esencialmente queda restringido. Si sólo el esmalte se calentara (y el acero continuara a temperatura constante), el máximo cambio de temperatura sería

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{térmico}} &= \alpha E \Delta T = \sigma_{\text{fractura}} \\ (10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})(15 \times 10^6 \text{ psi}) \Delta T &= 4000 \text{ psi} \\ \Delta T &= 26.7 \text{ } ^\circ\text{C}\end{aligned}$$

El acero también se expande, permitiendo así un aumento más grande en temperatura antes de la fractura. Su coeficiente de expansión térmica (tabla 22-2) es $12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, y su módulo de elasticidad es $30 \times 10^6 \text{ psi}$. Como el acero se expande más que el esmalte, todavía se introduce un esfuerzo en el esmalte. El coeficiente de expansión neto es

$$\begin{aligned}\Delta\alpha &= 12 \times 10^{-6} - 10 \times 10^{-6} = 2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \\ \sigma &= (2 \times 10^{-6})(15 \times 10^6) \Delta T = 4000 \\ \Delta T &= 133 \text{ } ^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Para permitir mayores variaciones de temperatura, se podría seleccionar un esmalte que tenga un más alto coeficiente de expansión térmica, un esmalte que tenga un menor módulo de elasticidad (de modo que se permitan deformaciones más grandes antes de que el esfuerzo llegue al esfuerzo de fractura), o un esmalte que tenga una resistencia mayor.

22-3 Conductividad térmica

La **conductividad térmica** k es una medida de la rapidez a la que se transmite calor en un material. El tratamiento de conductividad térmica es similar al de difusión (capítulo 5). *La conductividad térmica, similar al coeficiente de difusión, es una propiedad sensible a la microestructura.* La conductividad se relaciona con el calor Q transmitido por un determinado plano de área A por segundo, cuando existe un gradiente de temperatura $\Delta T/\Delta x$ (figura 22-5):

$$\frac{Q}{A} = k \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (22-6)$$

Nótese que la conductividad térmica k desempeña la misma función en la transferencia de calor que el coeficiente de difusión D en la transferencia de masa. Entre todos los metales, la plata (Ag) tiene la más elevada conductividad térmica a temperatura ambiente ($430 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). El cobre es el siguiente con una conductividad térmica de $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. En general, los metales tienen una conductividad térmica más alta que los materiales cerámicos; no obstante, el diamante, un material cerámico, tiene una conductividad térmica muy alta de $2000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. En la tabla 22-3 aparecen valores de la conductividad térmica de algunos materiales.

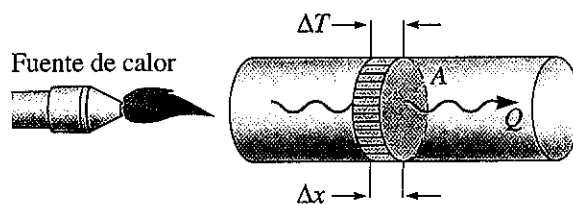


Figura 22-5

Cuando se calienta el extremo de una barra, un flujo de calor Q/A se mueve hacia el extremo frío con una rapidez determinada por el gradiente de temperatura producido en la barra.

TABLA 22-3 ■ Valores comunes de conductividad térmica a temperatura ambiente de materiales seleccionados

Material	Conductividad térmica (k) ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Material	Conductividad térmica (k) ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
Metales puros		Materiales cerámicos	
Ag	430	Al_2O_3	16–40
Al	238	Carbono (diamante)	2000
Cu	400	Carbono (grafito)	335
Fe	79	Arcilla refractaria	0.26
Mg	100	Carburo de silicio	hasta 270
Ni	90	AlN	hasta 270
Pb	35	Si_3N_4	hasta 150
Si	150	Vidrio de cal y sosa	0.96–1.7
Ti	22	Sílice vítrea	1.4
W	171	Vidrio Vycor™	12.5
Zn	117	XrO_2	4.2
Zr	23	Polímeros	
Aleaciones		Nylon 6,6	0.25
Acero 1020	100	Poliétileno	0.33
Aleación de aluminio 3003	280	Poliimida	0.21
Acero inoxidable 304	30	Poliestireno	0.13
Cementita	50	Espuma de poliestireno	0.029
Cu-30% Ni	50	Teflón	0.25
Ferrita	75		
Fundición de hierro gris	79.5		
Latón amarillo	221		

Nota: $1 \frac{\text{cal}}{\text{s}} \text{cm}^{-1} \text{K}^{-1} = 418.4 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$

La energía térmica es transferida por dos mecanismos importantes: transferencia de electrones libres y vibraciones de red (o fonones). Los electrones de valencia ganan energía, se mueven hacia las zonas más frías del material y transfieren su energía a los átomos. La cantidad de energía transferida depende del número de electrones excitados y de su movilidad; éstos, a su vez, dependen del tipo de material, de imperfecciones en la red, así como de la temperatura. Además, las vibraciones térmicamente inducidas de los átomos transfieren energía a través del material.

Metales Debido a que la banda de valencia no está llena por completo en los metales, los electrones requieren de poca excitación térmica para moverse y contribuir a la transferencia de calor. Como la conductividad térmica de los metales se debe principalmente a la aportación electrónica, se espera una relación entre las conductividades térmica y eléctrica:

$$\frac{k}{\sigma T} = L = 5.5 \times 10^{-9} \frac{\text{cal} \cdot \text{ohm}}{\text{s} \cdot \text{K}^2} \quad (22-7)$$

donde L es el **número de Lorenz**. Esta relación es seguida hasta cierto límite en muchos metales.

Cuando aumenta la temperatura del material, dos factores que se contraponen afectan la conductividad térmica. Se espera que las temperaturas más elevadas aumenten la

energía de los electrones, creando más “portadores” y aumentando la aportación de las vibraciones de la red; estos efectos aumentan la conductividad térmica. Al mismo tiempo, el número más grande de vibraciones de la red dispersa a los electrones, reduciendo su movilidad y, por tanto, tienden a reducir la conductividad térmica. El efecto combinado de estos factores lleva a un comportamiento muy diferente para distintos metales. Para el hierro, la conductividad térmica al principio disminuye al aumentar la temperatura (debido a la menor movilidad de los electrones), y luego aumenta ligeramente (debido a más vibraciones en la red). La conductividad *disminuye* en forma continua cuando el aluminio se calienta pero *aumenta* continuamente cuando el platino se calienta (figura 22-6).

La conductividad térmica en los metales también depende de los defectos en la estructura cristalina, de la microestructura y del procesamiento. Así, los metales trabajados en frío, los metales endurecidos por solución sólida y las aleaciones de dos fases pueden mostrar conductividades inferiores en comparación con sus similares que no tengan defectos.

Materiales cerámicos La brecha de energía en materiales cerámicos es demasiado grande para que muchos electrones sean excitados hacia la banda de conducción, excepto a temperaturas muy altas. Entonces, la transferencia de calor en materiales cerámicos ocurre básicamente por vibraciones de la red (o fonones). Como la contribución electrónica está ausente, la conductividad térmica de casi todos los materiales cerámicos es mucho menor que la de los metales. La razón principal por la cual la conductividad observada experimentalmente en materiales cerámicos es baja, sin embargo, es el nivel de porosidad. La porosidad aumenta la dispersión. El mejor ladrillo aislante, por ejemplo, contiene una fracción grande de porosidad. Una sinterización efectiva reduce la porosidad (y por tanto aumenta la conductividad térmica).

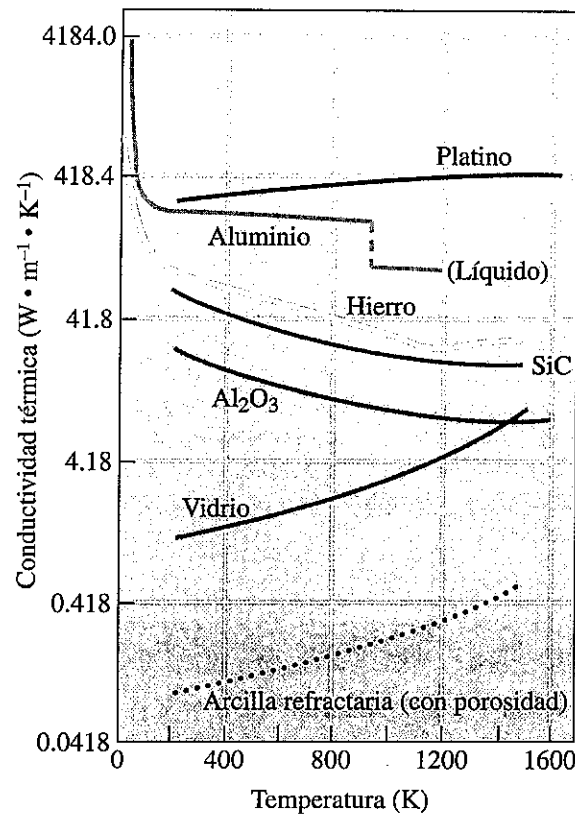


Figura 22-6
Efecto de la temperatura sobre la conductividad térmica de materiales seleccionados. Nótese la escala logarítmica en el eje vertical.

Los vidrios tienen una conductividad térmica baja. La estructura amorfa, débilmente empaquetada, reduce al mínimo los puntos en los cuales las cadenas de silicatos se ponen en contacto entre sí, haciendo más difícil la transferencia de fotones. La conductividad térmica aumenta a medida en que se incrementa la temperatura; temperaturas más elevadas producen más fonones energéticos y una más rápida transferencia de calor. En algunas aplicaciones, como en vidrios para ventanas, se usan hojas dobles de vidrio y se separan usando un gas (Ar, por ejemplo) para obtener mejor aislamiento térmico. También es posible usar diferentes recubrimientos sobre vidrios para hacer que los edificios y automóviles sean más eficientes en el uso de energía.

Las estructuras más ordenadas de los materiales cerámicos cristalinos, así como de los vidrios-cerámicos que contienen grandes cantidades de precipitados cristalinos, producen menos dispersión de fonones. En comparación con los vidrios estos materiales tienen una conductividad térmica más elevada, pero, cuando aumenta la temperatura, la dispersión se hace más pronunciada y la conductividad térmica disminuye (como se ve en la figura 22-6 para el carburo de silicio). A temperaturas todavía más altas, la transferencia de calor por radiación se hace importante y la conductividad aumenta. La conductividad térmica de los materiales cerámicos policristalinos es por lo general menor que la de cristales individuales.

Algunos materiales cerámicos como el diamante tienen conductividades térmicas muy altas. Los materiales con estructura muy empaquetada, y módulos de elasticidad elevados, producen fonones de alta energía que estimulan altas conductividades térmicas. Se ha demostrado que numerosos materiales cerámicos con una estructura cristalina semejante al diamante (por ejemplo AlN, SiC, BeO, BP, GaN, Si, AlP) tienen altas conductividades térmicas. Por ejemplo, se ha informado de conductividades térmicas de $\sim 270 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ para el SiC y el AlN. Aun cuando el SiC y el AlN son buenos conductores térmicos, también son aislantes eléctricos; por tanto, estos materiales son buenos candidatos para su uso en sustratos de paquetes electrónicos donde la disipación de calor es necesaria.

Semiconductores El calor es conducido en semiconductores por fonones y electrones. A bajas temperaturas, los fonones son los principales portadores de energía, pero, a temperaturas más elevadas, los electrones son excitados por la pequeña brecha de energía de la banda de conducción y la conductividad térmica aumenta de manera considerable.

Polímeros La conductividad térmica de los polímeros es muy baja, incluso en comparación con los vidrios de silicato. La vibración y el movimiento de cadenas moleculares de polímeros transfieren energía. Si se aumenta el grado de polimerización, se incrementa la cristalinidad, se reducen al mínimo las ramificaciones y hay grandes entrelazamientos, se obtiene una estructura más rígida y una conductividad térmica más elevada.

La conductividad térmica de numerosos materiales de ingeniería depende de las fracciones volumétricas de las diferentes fases y de su conectividad. Las resinas epóxicas cargadas de plata se emplean en muchas aplicaciones de transferencia de calor relacionadas con microelectrónica. Se obtiene un aislamiento térmico excepcionalmente bueno con el uso de espumas de polímero, a veces producido de poliestireno o poliuretano. Las tazas de café de Styrofoam™ son un producto típico. El siguiente ejemplo ilustra el diseño de un vidrio para ventanas con buena conductividad térmica.

Ejemplo 22-6 *Diseño de un vidrio para ventanas*

Diseñe un vidrio para una ventana cuadrada de $4 \times 4 \text{ ft}$ que separa un cuarto a 25°C del exterior que está a 40°C y permite que no más de $5 \times 10^6 \text{ cal}$ de calor entren al cuarto diariamente. Suponga que la conductividad térmica del vidrio es $0.96 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ o $0.0023 \frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K}}$.

SOLUCIÓN

De la ecuación 22-6,

$$\frac{Q}{A} = k \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

donde Q/A es el calor transferido por segundo por la ventana.

$$1 \text{ día} = (24 \text{ h/día})(3600 \text{ s/h}) = 8.64 \times 10^4 \text{ s}$$

$$A = [(4 \text{ ft})(12 \text{ pulg/pie})(2.54 \text{ cm/pulg})]^2 = 1.486 \times 10^4 \text{ cm}^2$$

$$Q = \frac{(5 \times 10^6 \text{ cal/día})}{8.64 \times 10^4 \text{ s/día}} = 57.87 \text{ cal/s}$$

$$\frac{Q}{A} = \frac{57.87 \text{ cal/s}}{1.486 \times 10^4 \text{ cm}^2} = 0.00389 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

$$\frac{Q}{A} = 0.00389 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} = \left(0.0023 \frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K}}\right)(40 - 25^\circ\text{C})/\Delta x$$

$$\Delta x = 8.85 \text{ cm} = \text{grosor}$$

El vidrio tendría que ser excepcionalmente grueso para impedir el flujo térmico máximo deseado. Se podrían hacer varias cosas para reducir el flujo de calor. Aun cuando todos los vidrios de silicato tienen conductividades térmicas similares, se podría usar un material polímero transparente (como el polimetilmetacrilato). Los polímeros tienen conductividades térmicas de aproximadamente un orden de magnitud menor que los vidrios cerámicos. Se podría usar un vidrio doble, con paneles de vidrio separados ya sea por un gas (el aire o el Ar tienen muy bajas conductividades térmicas) o una hoja de polímero transparente.

22-4 Choque térmico

Los esfuerzos que llevan a la fractura de materiales frágiles pueden introducirse térmica y mecánicamente. Cuando una pieza de material se enfría con gran rapidez, se produce un gradiente de temperatura. Este gradiente puede llevar a diferentes cantidades de contracción en distintas partes. Si los esfuerzos residuales de tensión se hacen altos lo suficientemente, los defectos pueden propagarse y causar falla. Un comportamiento similar puede ocurrir si el material se calienta rápidamente. Esta falla de un material causado por esfuerzos inducidos por rápidos cambios en temperatura se conoce como **choque térmico**. Varios factores afectan el comportamiento del choque térmico:

1. *Coeficiente de expansión térmica:* Un coeficiente bajo reduce al mínimo los cambios dimensionales y también la capacidad de resistir el choque térmico.
2. *Conductividad térmica:* La magnitud del gradiente de temperatura está determinado en parte por la conductividad térmica del material. Una conductividad térmica alta ayuda a transferir calor y reducir diferencias de temperatura rápidamente en el material.

3. *Módulo de elasticidad:* Un módulo de elasticidad bajo permite grandes cantidades de deformación antes de que el esfuerzo alcance el nivel crítico requerido para causar fractura.
4. *Esfuerzo a la fractura:* Un elevado esfuerzo requerido para la fractura permite tener deformaciones más grandes.
5. *Transformaciones de fase:* Los cambios dimensionales adicionales pueden ser causados por transformaciones de fase. La transformación del sílice de cuarzo a cristobalita, por ejemplo, introduce esfuerzos residuales y aumenta los problemas con el choque térmico. Del mismo modo, no se puede usar el material cerámico PbTiO_3 puro en ambientes sujetos a cambios de temperatura grandes y repentinos, porque los esfuerzos inducidos durante la transformación cúbica a tetragonal causarán que el material cerámico se fracture.

Un método para medir la resistencia al choque térmico es determinar la máxima diferencia de temperatura que pueda ser tolerada durante un templado sin afectar las propiedades mecánicas del material. El vidrio de sílice pura (fundido) tiene una resistencia al choque térmico de aproximadamente 3000 °C. En la figura 22.7 se muestra el efecto de la diferencia de temperatura en el módulo de ruptura del sialon ($\text{Si}_3\text{Al}_3\text{O}_3\text{N}_5$) después del templado; no hay evidencia de grietas y por tanto de cambio en las propiedades del material cerámico sino hasta que la diferencia en temperatura de templado se aproxime a 950 °C. Otros materiales cerámicos tienen menores resistencias. La resistencia al choque para la zirconia parcialmente estabilizada (PSZ) y Si_3N_4 es de unos 500 °C; para el SiC es de 350 °C; y para el Al_2O_3 y el vidrio ordinario, de unos 200 °C.

Otra forma de evaluar la resistencia de un material al choque térmico es mediante el parámetro de choque térmico (R' o R).

$$R' = \text{Parámetro de choque térmico} = \frac{\sigma_f k(1 - \nu)}{E \cdot \alpha} \quad (22-8a)$$

o

$$R = \frac{\sigma_f(1 - \nu)}{E \cdot \alpha} \quad (22-8b)$$

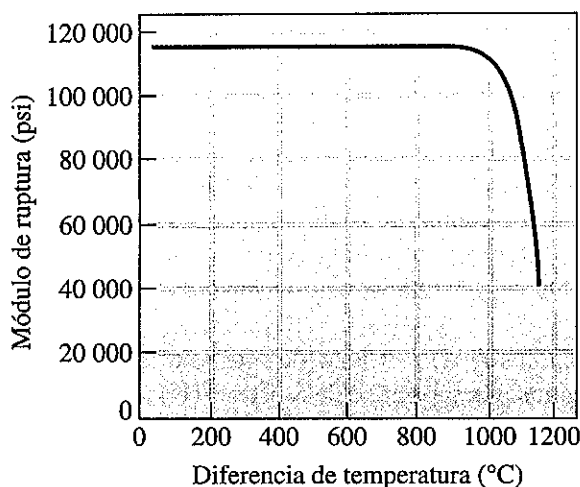


Figura 22-7

Efecto de la diferencia de temperatura de templado en el módulo de ruptura del sialon. La resistencia al choque térmico del material cerámico disminuye a unos 950 °C.

donde σ_f es el esfuerzo a la fractura del material, ν es la relación de Poisson, k es la conductividad térmica, E es el módulo de elasticidad y α es el coeficiente lineal de expansión térmica. La ecuación 22-8b se emplea en situaciones donde la rapidez de transferencia de calor es infinita en esencia. Un valor más alto del parámetro de choque térmico significa mejor resistencia al choque térmico. El parámetro del choque térmico representa el máximo cambio de temperatura que puede ocurrir sin fracturar el material.

Por lo general el choque térmico no es problema en casi todos los metales porque éstos normalmente tienen suficiente ductilidad para permitir deformación y no la fractura. Como ya se dijo antes, innumerables composiciones de materiales cerámicos creadas como materiales cerámicos de expansión térmica cero (basados en fosfatos de sodio y zirconio) y muchos materiales de vidrio-cerámicos tienen excelente resistencia al choque térmico.

Resumen

- Las propiedades térmicas de los materiales pueden explicarse al menos parcialmente por el movimiento de electrones y fonones.
- La capacidad calorífica y el calor específico representan la cantidad de energía requerida para elevar, en un grado, la temperatura de una cantidad determinada de material; la temperatura, la estructura cristalina y los enlaces influyen sobre ellos.
- El coeficiente de expansión térmica describe los cambios dimensionales que ocurren en un material cuando cambia su temperatura. Fuertes enlaces llevan a un bajo coeficiente de expansión. Los metales con alto punto de fusión y los materiales cerámicos tienen coeficientes bajos, mientras que los metales con bajo punto de fusión y los polímeros tienen coeficientes altos.
- La expansión térmica de muchos materiales de ingeniería puede acercarse a cero al controlar, en forma apropiada, las combinaciones de las diferentes fases que muestran coeficientes de expansión térmica positivos y negativos. El material vidrio-cerámico Zerodur™ y los materiales cerámicos NZP son ejemplos de estos materiales.
- Debido a la expansión térmica, se crean esfuerzos en un material cuando cambia la temperatura. Se requiere de cuidado en el diseño, procesamiento o selección de materiales para impedir fallas debidas a esfuerzos térmicos.
- El calor es transferido en materiales por medio de fonones y electrones. La conductividad térmica depende de las contribuciones relativas de cada uno de estos mecanismos, así como de la microestructura y de la temperatura.
- Los fonones desempeñan una importante función en las propiedades térmicas de los materiales cerámicos, semiconductores y polímeros. Las estructuras desordenadas, por ejemplo vidrios cerámicos o polímeros amorfs, dispersan los fonones y tienen baja conductividad.
- La conductividad térmica es sensible a la microestructura. Los materiales cerámicos que por lo común se encuentran tienen una baja conductividad térmica debido a su porosidad y a defectos.
- Los materiales cerámicos cristalinos y los polímeros tienen conductividades más altas que sus similares vítreos o amorfs.
- Las aportaciones electrónicas a la conductividad térmica son más importantes en metales; en consecuencia, las imperfecciones en la red que dispersan electrones reducen la conductividad. Una temperatura creciente aumenta la energía de los fonones pero también incrementa la dispersión tanto de los fonones como de los electrones.

Glosario

Calor específico Energía necesaria para elevar, en un grado, la temperatura de un gramo de un material.

Capacidad calorífica Energía requerida para elevar, en un grado, la temperatura de un mol de un material.

Choque térmico Falla de un material causado por esfuerzos introducidos por cambios repentinos en temperatura.

Coefficiente lineal de expansión térmica Describe la cantidad en la que cambia cada longitud unitaria de material cuando la temperatura de ese material cambia en un grado.

Conductividad térmica (k) Propiedad sensible a la microestructura que mide la rapidez a la que se transfiere calor por un material.

Esfuerzos térmicos Esfuerzos introducidos en un material debido a diferencias en la cantidad de expansión o contracción que ocurren por un cambio de temperatura.

Fonón Paquete de ondas elásticas. Está caracterizado por su energía, longitud de onda o frecuencia, que transfieren energía a través de un material.

Número de Lorenz Constante que relaciona la conductividad eléctrica con la térmica.

Problemas

Sección 22-1 Capacidad térmica y calor específico

22-1 Exprese dos aplicaciones cualesquiera donde resulta deseable una alta conductividad térmica.

22-2 Exprese dos aplicaciones cualesquiera donde resulta deseable una baja conductividad térmica de un material.

22-3 Calcule el aumento en temperatura para muestras de 1 kg de los siguientes metales:

- a) Al,
- b) Cu,
- c) Fe y
- d) Ni.

Cuando se aplican 20 000 joules de calor al metal a 25 °C.

22-4 Calcule el calor (en calorías y joules) necesario para elevar, en 50 °C, la temperatura de 1 kg de los siguientes materiales:

- a) plomo,
- b) níquel,
- c) Si_3N_4 y
- d) nylon 6,6.

22-5 Calcule la temperatura de una muestra de 100 g de los siguientes materiales (original-

mente a 25 °C) cuando se les introducen 3000 calorías:

- a) tungsteno,
- b) titanio,
- c) Al_2O_3 y
- d) polietileno de baja densidad.

22-6 Un aislante de alúmina para un dispositivo eléctrico también debe servir como disipador de calor. Durante su uso, se observa un aumento de temperatura de 10 °C en un aislante de alúmina de $1 \times 1 \times 0.02$ cm. Determine el grosor de un aislante de polietileno de alta densidad que sería necesario para obtener el mismo desempeño como disipador de calor. La densidad de la alúmina es de 3.96 g/cm³.

22-7 Una muestra de 200 g de aluminio se calienta a 400 °C y a continuación se temple en 2000 cm³ de agua a 20 °C. Calcule la temperatura del agua después de que el aluminio y el agua alcancen el equilibrio. Suponga que no hay pérdida de calor de este sistema.

Sección 22-2 Expansión térmica

22-8 Se fabrica una hoja de vidrio de cal y sosa, de 2 m de largo, a 1400 °C. Determine su longitud después de que se enfríe a 25 °C.

- 22-9** Una pieza fundida de cobre requiere que sus dimensiones finales sean $2.5 \times 50 \times 10$ cm. Determine las dimensiones del modelo que debe usarse para hacer el molde en el que se vacía el cobre líquido durante el proceso de manufactura.
- 22-10** Se ha de fabricar una pieza fundida de cobre que tenga las dimensiones finales de $1 \times 12 \times 24$ pulg. Determine las dimensiones del modelo que debe usarse para hacer el molde en el que se vacía el cobre líquido durante el proceso de manufactura.
- 22-11** Una pieza de aluminio fundido se fabrica usando el proceso de molde permanente. En este proceso, se vacía aluminio líquido en un molde de hierro fundido gris que se calienta a 350°C . Se desea producir una pieza fundida de aluminio que mide 15 pulg a 25°C . Calcule la longitud de la cavidad que debe maquinarse en el molde de hierro fundido gris.
- 22-12** Una tira de aleación de Ti y una tira de acero inoxidable se unen por laminado a 760°C . Si la longitud total de la tira bimetalica es de 1 m de largo cuando se lamina en caliente, calcule la longitud de cada tira de metal a 25°C . ¿Cuál es la naturaleza del esfuerzo (compresión o tensión) justo bajo la superficie del lado de la aleación de Ti y en el lado de acero inoxidable?
- 22-13** Se recubre un alambre de cobre de 100 cm de largo y 2 mm de diámetro con un recubrimiento de aislante epóxico de 0.5 mm de grueso. Determine la longitud del cobre y del recubrimiento cuando su temperatura aumenta de 25 a 250°C . ¿Qué es probable que le ocurra al recubrimiento epóxico como resultado de este calentamiento?
- 22-14** Se produce un material compuesto bimetalico de 10 pulg de largo, compuesto por una tira de latón amarillo unida a una tira de Invar. Determine la longitud a la que cada material se dilatará cuando la temperatura aumenta de 20 a 150°C . Trace un bosquejo que muestre lo que le ocurrirá a la forma de la tira bimetalica.
- 22-15** Dé ejemplos de materiales que tengan coeficientes de expansión térmica negativos o casi iguales a cero.
- 22-16** ¿Qué es el Zerodur™? ¿Cuáles son algunas de las propiedades y aplicaciones de este material?
- 22-17** Una pieza maquinada de níquel se recubre con SiC para obtener resistencia a la corrosión a altas temperaturas. Si no hay esfuerzos residuales presentes en la pieza a 20°C , determine los esfuerzos térmicos que se forman cuando la pieza se calienta a 1000°C durante su uso. (Véanse las tablas 15-3 y 22-2.)
- 22-18** Se incorporan fibras de alúmina de 2 cm de largo a una matriz de aluminio. Suponiendo que hay buen enlace entre las fibras de material cerámico y el aluminio, estime los esfuerzos térmicos que actúan sobre la fibra cuando aumenta 250°C la temperatura del compuesto. ¿Los esfuerzos sobre la fibra son de tensión o de compresión? (Véanse las tablas 15-3 y 22-2.)
- 22-19** Una barra de cobre de 24 pulg de largo con límite elástico de 30 000 psi se calienta a 120°C e inmediatamente se sujeta con firmeza a una estructura rígida. ¿El cobre se deformará plásticamente durante el enfriamiento a 25°C ? ¿Cuánto se deformará la barra si se suelta de la estructura después del enfriamiento?
- 22-20** Repita el problema 22-19, pero usando una varilla de carburo de silicio y no una varilla de cobre. (Véanse las tablas 15-3 y 22-2.)

Sección 22-3 Conductividad térmica

Sección 22-4 Choque térmico

- 22-21** Defina los términos conductividad térmica y choque térmico de materiales.
- 22-22** La conductividad térmica de la mayor parte de los materiales cerámicos es baja. ¿Cierto o falso? Explique.
- 22-23** ¿La conductividad térmica de los materiales es una propiedad sensible a la microestructura? Explique.
- 22-24** Si una barra de plata de 1 m de largo se calienta en un extremo a 300°C y la temperatura medida en el otro extremo es de 100°C , calcule el calor transferido por unidad de área.
- 22-25** Una placa de 3 cm de carburo de silicio separa aluminio líquido (mantenido a 700°C) de un casco de acero enfriado por agua y mantenido a 20°C . Calcule el calor Q transferido al acero por cm^2 de carburo de silicio en cada segundo.
- 22-26** Una hoja de 0.01 pulg de polietileno está emparedada entre dos hojas de 3×3 pies $\times 0.125$

pulg de vidrio de sosa y cal para fabricar una ventana. La conductividad térmica del polietileno es 0.33. Calcule a) el calor perdido a través de la ventana cada día cuando la temperatura del cuarto es de 25 °C y el aire exterior está a 0 °C y b) el calor que entra a través de la ventana cada día cuando la temperatura del cuarto es de 25 °C y el aire exterior está a 40 °C.

- 22-27** Se desea construir una placa de deflexión de calor que permita la transferencia rápida de calor paralelamente a la hoja, pero lenta en la dirección perpendicular a la hoja. En consecuencia, se incorpora 1 kg de alambres de cobre dispuestos en una sola dirección, cada uno de 0.1 cm de diámetro, en una matriz de polímero poliimida de 5 kg. Estime la conductividad térmica en la dirección paralela y en la dirección perpendicular a los alambres.
- 22-28** Una reacción exotérmica en el electrodo de una batería libera 80 MW de potencia por metro cuadrado. El electrodo está formado por una capa de grafito de 5 μm de grueso en una hoja de cobre de 20 μm de grueso; la reacción ocurre en la superficie del grafito y es necesario que el calor sea transferido hacia fuera por el grafito de la hoja de cobre. La temperatura del lado exterior de la hoja de cobre se mantiene a 30 °C. ¿Cuál es la temperatura en la superficie interior del electrodo?
- 22-29** Suponga que se sumerge una varilla de aluminio, de 1 cm de diámetro y 10 cm de largo, en un litro de agua a 20 °C. El otro extremo de la varilla está en contacto con una fuente de calor que opera a 400 °C. Determine el tiempo necesario para calentar el agua a 25 °C si 75% del calor se pierde por radiación desde la barra.
- 22-30** Escriba las ecuaciones que definen el parámetro de resistencia térmica de choque (RCT). Con base en esto, ¿qué puede decir acerca de los materiales que muestran un coeficiente de expansión térmica cercano a cero?
- 22-31** Determine el parámetro de choque térmico para el nitruro de silicio, el carburo de silicio prensado en caliente y la alúmina. Compárelo con la resistencia al choque térmico definida por la máxima diferencia de temperatura de templado. (Véase la tabla 15-3.)

- 22-32** El hierro fundido gris tiene una conductividad térmica más alta que el hierro fundido dúctil o maleable. Repase el capítulo 13 y explique por qué puede esperarse esta diferencia en conductividad.



Problemas de diseño

- 22-33** Un recipiente para reacciones químicas contiene líquidos a una temperatura de 680 °C. La pared del recipiente debe construirse de modo que la pared exterior opere a una temperatura de 35 °C o menor. Diseñe la pared del recipiente y los materiales apropiados si la transferencia calorífica máxima es de 6 000 cal/s.
- 22-34** Diseñe un panel de metal recubierto con esmalte vítreo capaz de soportar un ciclado térmico entre 20 y 150 °C. Es de esperar que los vidrios, que por lo general se encuentran en el mercado, tengan una resistencia a la tensión de 5 000 psi y una resistencia a la compresión de 50 000 psi.
- 22-35** ¿Cuáles limitaciones de diseño existen para seleccionar materiales para un álabe de turbina en un motor a reacción capaz de operar a altas temperaturas?
- 22-36** Considere los requisitos de una constante dieléctrica baja, de una pérdida dieléctrica baja, buena resistencia mecánica y alta conductividad térmica para sustratos de empaquetamiento electrónico. ¿Qué materiales escogería?



Problemas de cómputo

- 22-37** *Parámetros de resistencia al choque térmico.* Escriba un programa de cómputo o utilice software de hoja de cálculo que dé el valor de parámetros de resistencia al choque térmico (RCT), cuando se dan los valores del esfuerzo a la fractura, la conductividad térmica, el módulo de Young, la relación de Poisson y el coeficiente de expansión térmica.

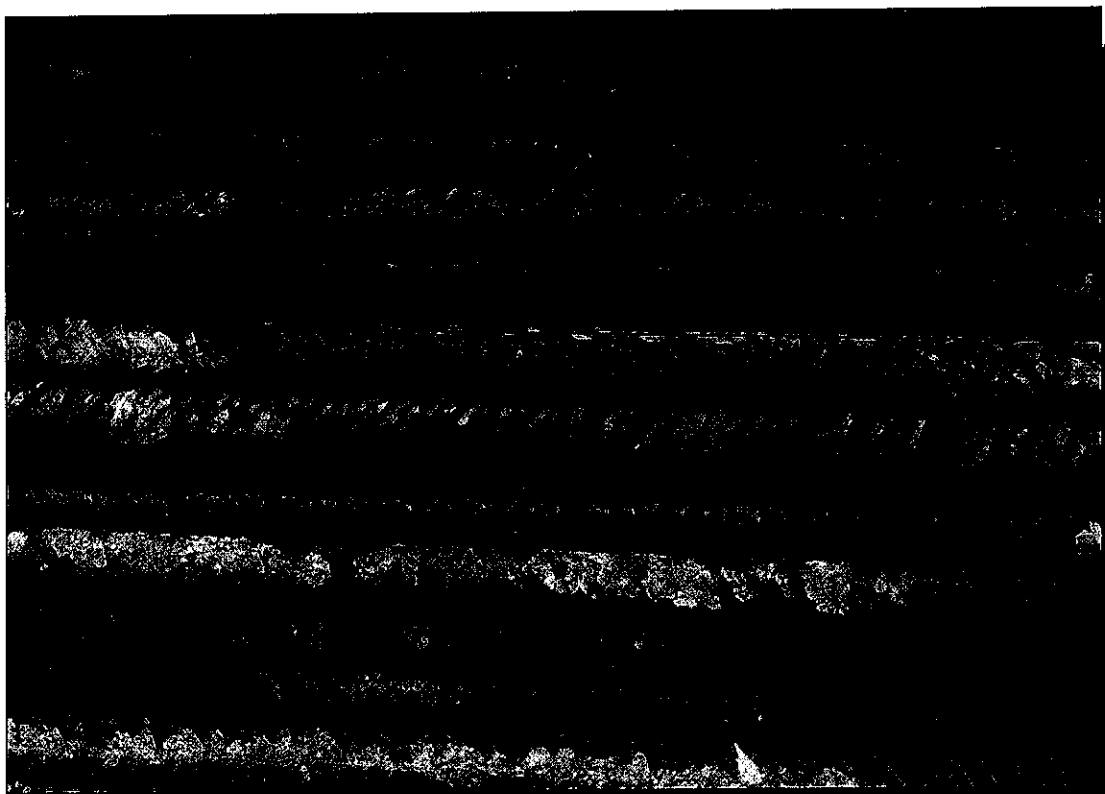
K **Knovel® Problemas**

K22-1 La capacidad térmica molar es la energía necesaria para aumentar, en un grado, la temperatura de un mol de un material. ¿Cuánto calor se requiere para llevar al punto de fusión 50 moles de etanol almacenados a 25 °C? (Obsérvese que el etanol también se conoce como alcohol etílico.)

K22-2 El coeficiente de expansión térmica es el cambio en longitud de un material, por uni-

dad de longitud por grado de cambio de temperatura. Una barra de oro mide inicialmente 1 m de largo. ¿Cuál es la longitud de la barra de oro después de haber sido calentada de 298 a 473 K?

K22-3 Tres disipadores de calor son idénticos, excepto que están hechos de materiales diferentes: oro, plata y cobre. ¿Cuál disipador de calor extrae calor con más rapidez?



Casi todas las naciones desarrolladas gastan alrededor del 6% del total de su producto interno bruto en resolver problemas relacionados con la corrosión. En Estados Unidos, esto asciende a unos 550 mil millones de dólares al año. El proceso de la corrosión afecta muchas áreas importantes de la tecnología, incluyendo la construcción y manufactura de puentes, aviones, barcos y la microelectrónica, la industria de alimentos, exploración espacial, redes de fibras ópticas y plantas de energía eléctrica nuclear y convencional, por mencionar algunas. La corrosión puede evitarse o contenerse si se usan diferentes técnicas que incluyen el uso de recubrimientos y protección anódica y catódica.

Como el acero es el material estructural más importante y puede ser altamente susceptible a la corrosión, dependiendo de su composición, la corrosión en el acero es un problema importante en ingeniería. La fotografía de esta página muestra la oxidación de barras de acero que se usan para reforzar concreto (conocidas como "varillas de refuerzo") cuando quedan expuestas a la intemperie. El óxido que por lo general se observa en aceros es óxido de hierro que se forma como resultado de una reacción electroquímica conocida como corrosión galvánica. En este proceso, el acero se consume para formar el frágil óxido, que puede descascararse posteriormente y degradar la barra.

Corrosión y desgaste

¿Se ha preguntado alguna vez?

- ¿Por qué se oxida el hierro?
- ¿Qué significa el acrónimo "WD-40TM"?
- ¿Si el proceso de corrosión tiene alguna utilidad?
- ¿Por qué los tanques de calentadores de agua domésticos contienen varillas de Mg?
- ¿Si los metales como el aluminio y titanio sufren corrosión?
- ¿Cómo afecta la corrosión a la vida útil de diferentes componentes, por ejemplo, los cigüñales?
- ¿Qué proceso utiliza la erosión mecánica y la corrosión química en la manufactura de chips semiconductores?

La composición e integridad física de un material sólido se altera en un ambiente corrosivo. En la corrosión química, un líquido corrosivo disuelve el material; en la corrosión electroquímica, se retiran átomos del metal sólido como resultado de un circuito eléctrico producido. Los metales y ciertos materiales cerámicos reaccionan en un ambiente gaseoso, por lo general a temperaturas elevadas, y el material puede destruirse debido a la formación de óxido y otros compuestos. Los polímeros se degradan al ser expuestos al oxígeno a temperaturas elevadas. Los materiales pueden alterarse si se exponen a una radiación o incluso a bacterias. Por último, una variedad de mecanismos de desgaste y de corrosión por desgaste alteran la forma de materiales. De acuerdo con un estudio concluido en 2001, en Estados Unidos, el combate a la corrosión cuesta alrededor del 6% del producto interno bruto (PIB). Esta cantidad, que incluye costos directos e indirectos, fue aproximadamente de \$550 mil millones en 1998.

El proceso de corrosión se presenta con la finalidad de reducir la energía libre de un sistema; ocurre durante un tiempo y puede presentarse ya sea a altas o a bajas temperaturas. La corrosión química es una importante consideración en muchos sectores, entre los que se cuentan el de transporte (puentes, oleoductos, automóviles,

aviones, trenes y barcos), servicios públicos (energía eléctrica, agua, telecomunicaciones y plantas de energía nuclear), así como en la producción y manufactura (industria alimenticia, microelectrónica y refinación de petróleo).

En algunas aplicaciones, la corrosión u oxidación tiene utilidad. Los procesos de corrosión y erosión químicas se utilizan para hacer superficies ultraplanas de obleas de silicio para chips de computadora. Del mismo modo, la degradación y la disolución de ciertos biopolímeros son útiles en algunas aplicaciones médicas, por ejemplo para disolver suturas.

El objetivo de este capítulo es presentar los principios y mecanismos por los cuales ocurren la corrosión y el desgaste bajo diferentes condiciones. Esto incluye la corrosión acuosa de metales, la oxidación de metales, la corrosión de productos cerámicos y la degradación de polímeros. Se ofrecerá un resumen de diferentes tecnologías que se utilizan para impedir o reducir al mínimo la corrosión y sus problemas conexos.

23-1 Corrosión química

En la **corrosión química**, o disolución directa, un material se disuelve en un medio líquido corrosivo. El material seguirá en disolución hasta que se consuma o el líquido se sature. Un ejemplo es la formación de una pátina de color verde en la superficie de aleaciones de base de cobre. Esto se debe a la formación de carbonato de cobre e hidróxidos de cobre y es la razón, por ejemplo, del aspecto verdoso de la Estatua de la Libertad. La corrosión química del cobre, tantalio, silicio, dióxido de silicio y otros materiales se puede lograr mediante condiciones extremadamente bien controladas. En el procesamiento de obleas de silicio, por ejemplo, un proceso conocido como pulido químico mecánico se utilizan lodos de sílice para obtener una erosión mecánica. Este proceso crea superficies extremadamente planas que son apropiadas para el procesamiento de obleas de silicio. La corrosión química también se presenta en la naturaleza. Por ejemplo, la corrosión química de rocas mediante el ácido carbónico (H_2CO_3) y la erosión mecánica del viento y el agua desempeñan una importante función en la formación de cañones y cavernas.

Ataque por metal líquido Los metales líquidos atacan primero un sólido en lugares de alta energía, como son los límites de grano. Si estas regiones continúan siendo atacadas de manera preferencial, en última instancia se presentarán grietas (figura 23-1). Con frecuencia esta forma de corrosión se complica por la presencia de fundentes que aceleran el ataque o por corrosión electroquímica. Metales agresivos como el litio líquido también pueden atacar a productos cerámicos.



Figura 23-1

El plomo fundido se mantiene en cubas de acero gruesas durante la refinación. En este caso, el plomo fundido ha atacado una soldadura en una placa de acero y se han formado grietas. Por último, las grietas se propagan por el acero y el plomo fundido se fuga de la cuba.
(Reimpresa por cortesía de Don Askeland.)

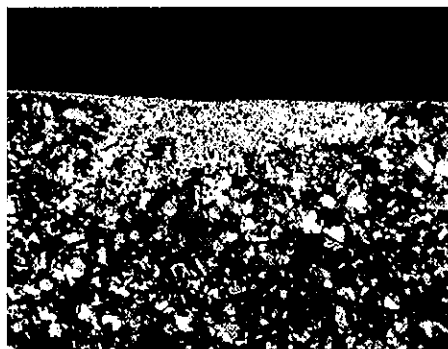


Figura 23-2
Micrografía de un depósito de cobre en latón,
que muestra el efecto de deszincificado (50x).
(Reimpreso por cortesía de Don Askeland.)

Lixiviación selectiva Un elemento particular en una aleación puede ser disuelto de manera selectiva, o lixiviado, del sólido. El **deszincificado** ocurre en latón que contiene más de 15% de Zn. Tanto el cobre como el zinc son disueltos por soluciones acuosas a temperaturas elevadas; los iones de zinc permanecen en una solución en tanto que los iones de cobre se vuelven a depositar en el latón (figura 23-2). Por último, el latón se hace poroso y débil.

La **corrosión gráfica** de hierro fundido gris se presenta cuando el hierro es disuelto de manera selectiva en agua o en tierra, desprendiendo hojuelas de grafito y un producto de la corrosión. La corrosión gráfica localizada a veces causa fugas o fallas de las tuberías de hierro gris que llevan gas, lo que ocasiona explosiones.

Disolución y oxidación de productos cerámicos Los refractarios cerámicos que se utilizan para contener metal fundido durante la fundición o refinado pueden ser disueltos por las escorias que se producen en la superficie del metal. Por ejemplo, un refractario ácido (alto SiO_2) es rápidamente atacado por una escoria básica (alto CaO o MgO). Un vidrio producido de SiO_2 y Na_2O es rápidamente atacado por agua; debe agregarse CaO al vidrio para reducir al mínimo este ataque. El ácido nítrico puede lixiviar selectivamente hierro o sílice de algunos productos cerámicos, reduciendo su resistencia y densidad. Como ya se dijo en los capítulos 7 y 15, la resistencia de vidrios de silicato depende de fallas que a veces son creadas por interacciones corrosivas con agua.

Ataque químico en polímeros En comparación con los metales y materiales cerámicos de óxido, los plásticos se consideran resistentes a la corrosión. El Teflón™ y el Viton™ son algunos de los materiales más resistentes a la corrosión y se usan en numerosas aplicaciones, incluyendo la industria química de procesos. Éstos y otros materiales poliméricos pueden resistir la presencia de muchos ácidos, bases y líquidos orgánicos, pero los solventes agresivos con frecuencia se difunden en polímeros termoplásticos de peso molecular bajo. A medida que se incorpora un solvente en el polímero, las moléculas del polímero, más pequeñas, separan las cadenas y causan hinchazón. Entonces se reduce la resistencia de los enlaces entre cadenas y esto conduce a polímeros más blandos, de menor resistencia, con una baja temperatura de transición vítrea. En casos extremos, la hinchazón causa grietas por esfuerzo.

Los materiales termoplásticos también pueden ser disueltos en un solvente. Una exposición prolongada ocasiona una pérdida de material y debilitamiento de la pieza polimérica. Este proceso se presenta con más facilidad cuando la temperatura es alta y cuando el polímero tiene un bajo peso molecular, está muy ramificado, es amorfo y no tiene enlaces cruzados. La estructura del monómero también es importante; los grupos de CH_3 en la cadena polimérica del polipropileno pueden eliminarse con más facilidad de la cadena de iones de cloruro o de fluoruro en el cloruro de polivinilo (PVC) o del politetrafluoretileno (Teflón™). Éste tiene una resistencia excepcional al ataque químico de casi todos los disolventes.

23-2 Corrosión electroquímica

La **corrosión electroquímica**, que es la forma más común de ataque de metales, se presenta cuando los átomos del metal pierden electrones y se convierten en iones. A medida que el metal es gradualmente consumido por este proceso, por lo general se forma un subproducto del proceso de corrosión. La corrosión electroquímica ocurre con más frecuencia en un medio acuoso, en el que hay iones presentes en agua, tierra o aire húmedo. En este proceso, se crea un circuito eléctrico y el sistema recibe el nombre de **celda electroquímica**. La corrosión de un tubo de acero o de un tablero de acero de un automóvil, que crea agujeros en el acero y óxido como subproducto, son ejemplos de esta reacción.

Aun cuando son causantes de la corrosión, las celdas electroquímicas también pueden tener cierta utilidad. Al crear en forma deliberada un circuito eléctrico, se pueden *electrochapar* capas protectoras o decorativas en materiales. En algunos casos, la corrosión electroquímica es incluso deseable. Por ejemplo, en el ataque químico de una superficie metálica pulida con un ácido apropiado, varias características de la microestructura son atacadas de manera selectiva, lo que permite observarlas. De hecho, casi todas las fotografías de las microestructuras metálicas y de aleaciones de este texto se obtuvieron en esta forma, haciendo así posible, por ejemplo, la observación de perlita en acero o límites de grano en cobre.

Componentes de una celda electroquímica Hay cuatro componentes en una celda electroquímica (figura 23-3):

1. El **ánodo** cede electrones al circuito y se corroe.
2. El **cátodo** recibe electrones del circuito por medio de una reacción química, o catódica. Los iones que se combinan con los electrones producen un subproducto en el cátodo.
3. El ánodo y el cátodo deben estar eléctricamente conectados, por lo general por contacto físico, para permitir que los electrones fluyan del ánodo al cátodo y continúe la reacción.
4. Un **electrolito** líquido debe estar en contacto tanto con el ánodo como con el cátodo. El electrolito es conductor, completando así el circuito. Proporciona los medios por los cuales los iones metálicos salen de la superficie del ánodo y se mueven al cátodo para aceptar los electrones.

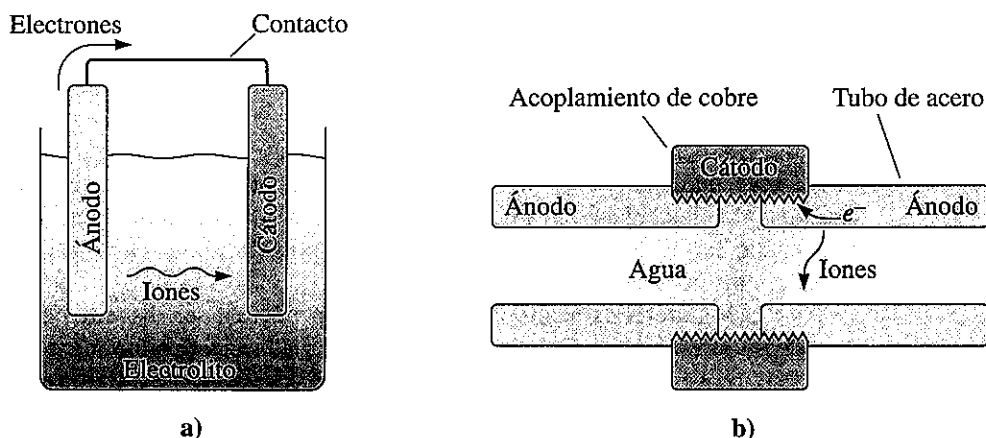


Figura 23-3 Componentes en una celda electroquímica: a) celda electroquímica simple y b) celda de corrosión entre un tubo de acero para agua y un acoplamiento de cobre.

Esta descripción de una celda electroquímica define la corrosión electroquímica. Si se depositan en el cátodo iones metálicos, ocurre un *electrochapado*.

Reacción anódica El ánodo, que es un metal, experimenta una **reacción de oxidación** por medio de la cual se ionizan los átomos del metal. Los iones metálicos entran en la solución electrolítica, en tanto que los electrones salen del ánodo por la conexión eléctrica:



Como los iones del metal salen del ánodo, éste se corroe, es decir, se oxida.

Reacción catódica en el electrochapado En el electrochapado, ocurre en el cátodo una **reacción de reducción** catódica, que es la inversa de la reacción anódica:



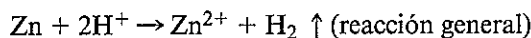
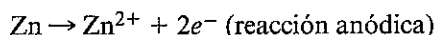
Los iones metálicos, ya sea que se hayan agregado de manera intencional al electrolito o que se hayan formado debido a la reacción anódica, se combinan con los electrones en el cátodo. El metal entonces se electrodeposita y cubre la superficie del cátodo.

Reacciones catódicas en la corrosión Excepto en condiciones inusuales el chapado de metales no ocurre durante la corrosión electroquímica. En cambio, la reacción de reducción forma un subproducto gaseoso, sólido o líquido en el cátodo (figura 23-4).

1. *El electrodo de hidrógeno*: En líquidos libres de oxígeno, por ejemplo el ácido hidrocórico (HCl) o agua estancada, el gas hidrógeno puede desprenderse del cátodo:

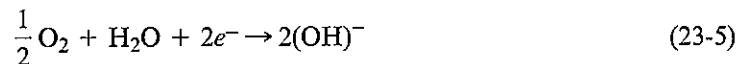


Si el zinc se colocara en ese ambiente, se encontraría que toda la reacción es

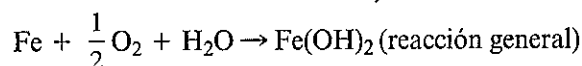
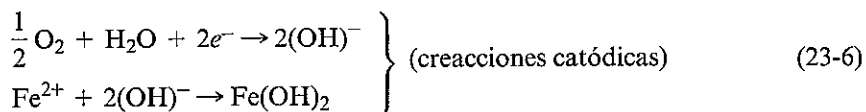
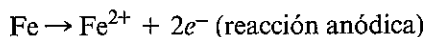


El ánodo de zinc gradualmente se disuelve y las burbujas de hidrógeno continúan desprendiéndose del cátodo.

2. *El electrodo de oxígeno*: En agua ventilada, existe oxígeno disponible para el cátodo, y se forman iones hidroxilo, es decir $(OH)^{-}$:



El electrodo de oxígeno enriquece al electrolito con iones $(OH)^{-}$. Estos iones reaccionan con iones metálicos cargados positivamente y crean un producto sólido. En el caso de la oxidación del hierro:



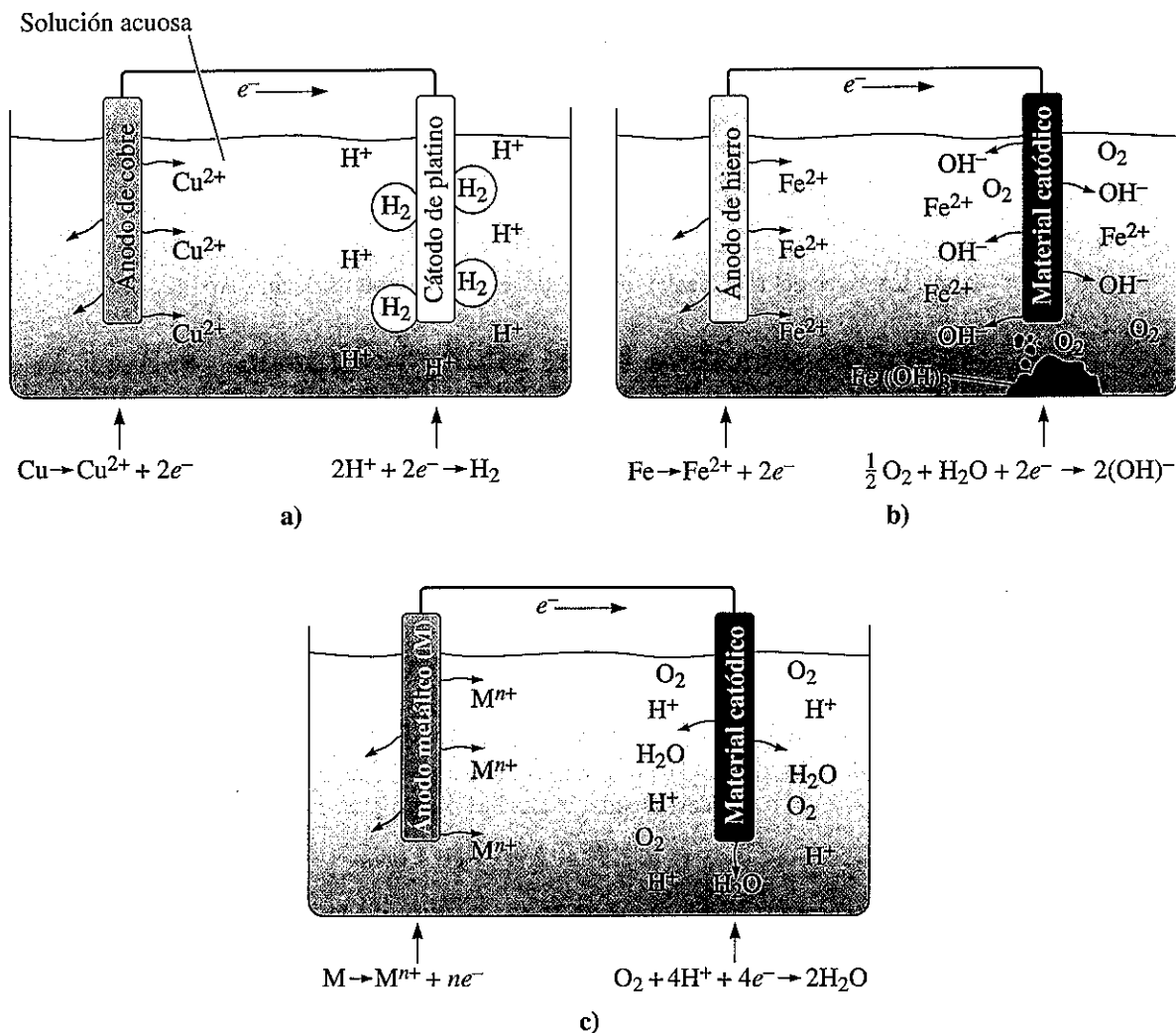
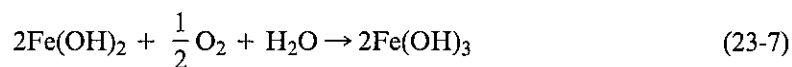


Figura 23-4 Reacciones anódicas y catódicas en celdas electroquímicas de corrosión comunes: a) electrodo de hidrógeno, b) electrodo de oxígeno y c) electrodo del agua.

La reacción continúa a medida que el $\text{Fe}(\text{OH})_2$ reacciona con más oxígeno y agua:



El $\text{Fe}(\text{OH})_3$ se conoce comúnmente como *herrumbre*.

3. *El electrodo del agua:* En la oxidación de los ácidos, la reacción catódica produce agua como subproducto:



Si se dispone de una fuente continua de oxígeno e hidrógeno, el electrodo de agua no produce acumulación de herrumbre sólida ni una alta concentración o dilución de iones en el cátodo.

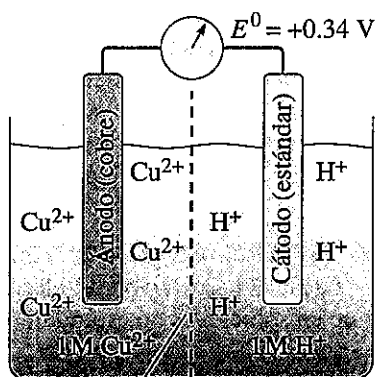
23-3 Potencial del electrodo en celdas electroquímicas

En la corrosión, de manera natural se forma un potencial cuando un material se coloca en una solución. En seguida se verá cómo se forma el potencial necesario para activar la reacción de corrosión.

Potencial del electrodo Cuando en un electrolito se coloca un metal puro, se forma un **potencial del electrodo** que está relacionado con la tendencia del material a ceder sus electrones; no obstante, la fuerza de activación para la reacción de oxidación es compensada por una fuerza de activación igual pero de sentido contrario para la reacción de reducción. No hay corrosión neta. En consecuencia, no se puede medir el potencial del electrodo para un material de un solo electrodo.

Serie de fuerzas electromotrices Para determinar la tendencia de un metal a ceder sus electrones, se mide la diferencia de potencial entre el metal y un electrodo estándar por medio de una semicelda (figura 23-5). El electrodo del metal a probar se coloca en una solución de 1 mol (M) de sus iones. Un electrodo de referencia también se coloca en una solución de 1 M de iones. El electrodo de referencia suele ser un metal inerte que conduce electrones pero no reacciona con el electrolito. El uso de una solución de 1 M de iones de hidrógeno (H^+) con el electrodo de referencia es común. La reacción que ocurre en este electrodo de hidrógeno es $2H^+ + 2e^- = H_2$. El gas H_2 es suministrado al electrodo de hidrógeno. Una celda electroquímica como ésta se conoce como celda estándar cuando las mediciones se hacen a $25^\circ C$ y a presión atmosférica con concentraciones de electrolito de 1 M. Los dos electrolitos están en contacto eléctrico pero no se les permite mezclarse entre sí. Cada uno de los electrodos establece su propio potencial de electrodo. Al medir el voltaje entre los dos electrodos cuando se abre el circuito, se obtiene la diferencia de potencial. El potencial del electrodo del hidrógeno se hace de manera arbitraria igual a cero volts. Si el metal tiene una mayor tendencia a ceder electrones que el electrodo del hidrógeno, entonces el potencial del metal es negativo, es decir, el metal es anódico con respecto al electrodo de hidrógeno. Si el potencial del metal es positivo, el metal es catódico con respecto al electrodo de hidrógeno.

La **serie de fuerzas electromotrices** (o **fem**) que se muestran en la tabla 23-1 compara el potencial estándar del electrodo E^0 para cada uno de los metales con el del electrodo de



Pantalla que permite transferir carga pero no la mezcla de los electrolitos

Figura 23-5

Semicelda empleada para medir el potencial del electrodo de cobre bajo condiciones estándar. El potencial del electrodo de cobre es la diferencia de potencial entre éste y el electrodo estándar de hidrógeno en un circuito abierto. Como E^0 es mayor a cero, el cobre es catódico en comparación con el electrodo de hidrógeno.

TABLA 23-1 ■ Potenciales estándar de reducción para elementos y reacciones seleccionados

	Metal	Potencial del electrodo E^0 (volts)
Anódico	$\text{Li}^+ + e^- \rightarrow \text{Li}$	-3.05
	$\text{Mg}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Mg}$	-2.37
	$\text{Al}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{Al}$	-1.66
	$\text{Ti}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Ti}$	-1.63
	$\text{Mn}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Mn}$	-1.63
	$\text{Zn}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Zn}$	-0.76
	$\text{Cr}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{Cr}$	-0.74
	$\text{Fe}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Fe}$	-0.44
	$\text{Ni}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Ni}$	-0.25
	$\text{Sn}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Sn}$	-0.14
	$\text{Pb}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Pb}$	-0.13
	$2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{H}_2$	0.00 — (definido)
	$\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cu}$	+0.34
	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^- \rightarrow 4\text{OH}^-$	+0.40
	$\text{Ag}^+ + e^- \rightarrow \text{Ag}$	+0.80
	$\text{Pt}^{4+} + 4e^- \rightarrow \text{Pt}$	+1.20
	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	+1.23
Catódico	$\text{Au}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{Au}$	+1.50

hidrógeno bajo condiciones estándar de 25 °C y una solución de 1 M de iones en el electrolito. Nótese que la medición del potencial se hace cuando el circuito eléctrico está abierto. La diferencia de voltaje empieza a cambiar tan pronto como se cierra el circuito.

Cuanto más negativo sea el valor del potencial para la oxidación del metal, más electropositivo es el metal; esto significa que el metal tendrá una tendencia más elevada a experimentar la reacción de oxidación. Por ejemplo, los álcalis y los metales de tierras alcalinas (por ejemplo Li, K, Ba, Sr y Mg) son tan reactivos que se deben conservar bajo condiciones que impidan cualquier contacto con el oxígeno. Por el contrario, los metales que están hacia la parte inferior de la gráfica (por ejemplo Ag, Au y Pt) no tenderán a reaccionar con el oxígeno. Esta es la razón por la cual se conocen como “metales nobles”. Los metales como el Fe, Cu y Ni tienen reactividades intermedias, pero éste no es el único aspecto a considerar. El aluminio, por ejemplo, tiene un potencial estándar de electrodo fuertemente negativo y reacciona con gran facilidad con el oxígeno para formar óxido de aluminio; también reacciona con facilidad con el flúor para formar fluoruro de aluminio. Estos dos compuestos forman una capa tenaz e impenetrable que ayuda a parar cualquier corrosión adicional. El titanio también reacciona con facilidad con el oxígeno. El óxido de titanio rápidamente formado crea una barrera que impide la difusión adicional de las especies y, por tanto, evita la oxidación adicional. Ésta es la razón por la cual tanto el aluminio como el titanio son muy reactivos, pero pueden resistir la corrosión excepcionalmente bien. Obsérvese que la serie fem indica la factibilidad termodinámica y la fuerza de activación, pero no dice nada respecto a la cinética de la reacción.

Efecto de la concentración sobre el potencial del electrodo

El potencial del electrodo depende de la concentración del electrolito. A 25 °C, la ecuación de Nernst da el potencial del electrodo en soluciones no estándar:

$$E = E^0 + \frac{0.0592}{n} \log (C_{\text{ion}}) \quad (23-9)$$

donde E es el potencial del electrodo en una solución con una concentración C_{ion} del metal en unidades molares, n es la carga en el ion metálico y E^0 es el potencial estándar del electrodo en una solución 1 M. Nótese que cuando $C_{\text{ion}} = 1$, $E = E^0$. El ejemplo que sigue ilustra el cálculo del potencial del electrodo.

Ejemplo 23-1 Potencial de semicelda para el cobre

Suponga que se disuelve 1 g de cobre como Cu^{2+} en 1000 g de agua para producir un electrolito. Calcule el potencial del electrodo de la semicelda de cobre dentro de ese electrolito. Suponga $T = 25^\circ\text{C}$.

SOLUCIÓN

De la química se sabe que se obtiene una solución 1 M estándar de Cu^{2+} cuando se agrega 1 mol de Cu^{2+} (una cantidad igual a la masa atómica del cobre) a 1000 g de agua. La masa atómica del cobre es 63.54 g/mol. La concentración de la solución cuando sólo se agrega 1 g debe ser

$$C_{\text{ion}} = \frac{1}{63.54} = 0.0157 \text{ M}$$

De la ecuación de Nernst, con $n = 2$ y $E^0 = +0.34 \text{ V}$,

$$\begin{aligned} E &= E^0 + \frac{0.0592}{n} \log(C_{\text{ion}}) = 0.34 + \frac{0.0592}{2} \log(0.0157) \\ &= 0.34 + (0.0296)(-1.8) = 0.29 \text{ V} \end{aligned}$$

Rapidez de corrosión o de chapado La cantidad de metal depositado en el cátodo en el electrochapado, o eliminado del ánodo por corrosión, pueden determinarse a partir de la ecuación de Faraday,

$$w = \frac{ItM}{nF} \quad (23-10)$$

donde w es el peso depositado o corroído (g), I es la corriente (A), M es la masa atómica del metal, n es la carga en el ion metálico (s) y F es la constante de Faraday (96 500 C). Esta ley básicamente indica que equivalente de un gramo de un metal será depositado por 96 500 C de carga. A veces la corriente se expresa en términos de la densidad de corriente, $i = I/A$, de modo que la ecuación 23-10 se convierte en

$$w = \frac{iAtM}{nF} \quad (23-11)$$

donde el área A (cm^2) es el área superficial del ánodo o el cátodo.

Los siguientes ejemplos ilustran el uso de la ecuación de Faraday para calcular la densidad de corriente.

Ejemplo 23-2 Diseño de un proceso de chapado de cobre

Diseñe un proceso para el electrochapado de una capa de 0.1 cm de grueso de cobre en una superficie de cátodo de $1 \times 1 \text{ cm}$.

SOLUCIÓN

Para producir una capa de 0.1 cm de grueso en un área superficial de 1 cm^2 , la masa del cobre debe ser

$$\rho_{\text{Cu}} = 8.93 \text{ g/cm}^3 \quad A = 1 \text{ cm}^2$$

$$\text{Volumen de cobre} = (1 \text{ cm}^2)(0.1 \text{ cm}) = 0.1 \text{ cm}^3$$

$$\text{Masa de cobre} = (8.93 \text{ g/cm}^3)(0.1 \text{ cm}^3) = 0.893 \text{ g}$$

De la ecuación de Faraday, donde $M_{\text{Cu}} = 63.54 \text{ g/mol}$ y $n = 2$:

$$It = \frac{wnF}{M} = \frac{(0.893)(2)(96\,500)}{63.54} = 2712 \text{ A} \cdot \text{s}$$

Por tanto, se podrían usar varias combinaciones diferentes de corriente y tiempo para producir la placa de cobre:

Corriente	Tiempo
0.1 A	27 124 s = 7.5 h
1.0 A	2 712 s = 45.2 min
10.0 A	271.2 s = 4.5 min
100.0 A	27.12 s = 0.45 min

La opción de la combinación exacta de corriente y tiempo podría hacerse con base en la rapidez de producción y la calidad del cobre chapado. Corrientes bajas requieren tiempos muy largos de chapado, quizá haciendo así que el proceso sea económicamente no rentable. Por su parte, las corrientes elevadas pueden reducir la eficiencia del chapado. La efectividad del chapado puede depender de la composición del electrolito que contenga los iones de cobre, así como de cualesquier impurezas o aditivos que estén presentes. Corrientes de 10 o 100 A son demasiado altas; pueden iniciar otras reacciones laterales que no son deseables. El depósito también puede no ser uniforme y liso. Es posible que sean necesarios más conocimientos y experimentación para obtener el proceso de chapado más económico y eficiente. Una corriente de $\sim 1 \text{ A}$ y un tiempo de ~ 45 minutos no son raros en operaciones de chapado.

Ejemplo 23-3 Corrosión del hierro

Un recipiente de hierro de $10 \times 10 \text{ cm}$ de base contiene un líquido corrosivo hasta una altura de 20 cm. Como resultado de una celda electrolítica se produce una corriente y, después de cuatro semanas, el recipiente ha disminuido 70 g en peso. Calcule a) la corriente y b) la densidad de corriente que interviene en la corrosión del hierro.

SOLUCIÓN

a) El tiempo total de exposición es

$$t = (4 \text{ sem})(7 \text{ d/sem})(24 \text{ h/d})(3600 \text{ s/h}) = 2.42 \times 10^6 \text{ s}$$

De la ecuación de Faraday, usando $n = 2$ y $M = 55.847 \text{ g/mol}$,

$$\begin{aligned} I &= \frac{wnF}{tM} = \frac{(70)(2)(96\,500)}{(2.42 \times 10^6)(55.847)} \\ &= 0.1 \text{ A} \end{aligned}$$

- b) El área superficial total del hierro en contacto con el líquido corrosivo y la densidad de corriente son

$$A = (4 \text{ lados})(10 \times 20) + (1 \text{ fondo})(10 \times 10) = 900 \text{ cm}^2$$

$$i = \frac{I}{A} = \frac{0.1}{900} = 1.11 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$$

Ejemplo 23-4 *Celda de corrosión de cobre-zinc*

Suponga que en una celda de corrosión compuesta de cobre y zinc, la densidad de corriente en el cátodo de cobre es 0.05 A/cm^2 . El área de los electrodos de cobre y de zinc es de 100 cm^2 . Calcule a) la corriente de corrosión, b) la densidad de corriente en el ánodo de zinc y c) la pérdida de zinc por hora.

SOLUCIÓN

- a) La corriente de corrosión es

$$I = i_{\text{Cu}} A_{\text{Cu}} = (0.05 \text{ A/cm}^2)(100 \text{ cm}^2) = 5 \text{ A}$$

- b) La corriente en la celda es la misma en todas partes. Así,

$$i_{\text{Zn}} = \frac{I}{A_{\text{Zn}}} = \frac{5}{100} = 0.05 \text{ A/cm}^2$$

- c) La masa atómica del zinc es 65.38 g/mol . De la ecuación de Faraday:

$$\begin{aligned} w_{\text{pérdida de zinc}} &= \frac{ItM}{nF} = \frac{\left(5 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}\right)(3600 \text{ s/h})(65.38 \text{ g/mol})}{(2)(96500 \text{ C})} \\ &= 6.1 \text{ g/h} \end{aligned}$$

23-4 La corriente de corrosión y la polarización

Para proteger de la corrosión a los metales, es deseable que la corriente sea lo más pequeña posible. Desafortunadamente, la corriente de corrosión es muy difícil de medir, controlar o predecir. Parte de esta dificultad puede atribuirse a diversos cambios que ocurren durante la operación de la celda de corrosión. Un cambio en el potencial de un ánodo o cátodo, que a su vez afecta la corriente de la celda, se denomina **polarización**. Hay tres importantes clases de polarización: 1) activación, 2) concentración y 3) resistencia.

Polarización de activación Esta clase de polarización está relacionada con la energía necesaria para que ocurran reacciones anódicas o catódicas. Si se puede aumentar el grado de polarización, estas reacciones ocurren con mayor dificultad y se reduce la rapidez de corrosión. Pequeñas diferencias en composición y estructura en los materiales del ánodo y cátodo cambian considerablemente la polarización de activación. Los efectos de segregación en los electrodos causan que la polarización de activación varíe de un lugar a otro. Estos factores hacen difícil predecir la corriente de corrosión.

Polarización de concentración Una vez que se inicia la corrosión, pueden cambiar las concentraciones de iones en la superficie del ánodo o del cátodo. Por ejemplo, puede haber una mayor concentración de iones metálicos en el ánodo si los iones no pueden difundirse con rapidez en el electrolito. Los iones de hidrógeno pueden agotarse en el cátodo en el caso de un electrodo de hidrógeno, o se puede presentar una elevada concentración de $(OH)^-$ en el cátodo en el caso de un electrodo de oxígeno. Cuando esto ocurre, la reacción anódica o la catódica se sofoca debido a que se liberan menos electrones en el ánodo o se aceptan en el cátodo.

En cualquiera de estos ejemplos, la densidad de corriente y, por tanto, la rapidez de corrosión, disminuye debido a la polarización de concentración. Normalmente, la polarización es menos pronunciada cuando el electrolito está muy concentrado, la temperatura se incrementa o el electrolito es agitado vigorosamente. Cada uno de estos factores aumenta la densidad de corriente y estimula la corrosión electroquímica.

Polarización de resistencia Este tipo de polarización se presenta por la resistividad eléctrica del electrolito. Si se presenta una mayor resistencia al flujo de la corriente, la rapidez de corrosión se reduce. De nuevo, el grado de polarización de resistencia puede cambiar cuando cambia la composición del electrolito durante el proceso de corrosión.

23-5 Tipos de corrosión electroquímica

En esta sección se verán algunas de las formas más comunes que presenta la corrosión electroquímica. En primer término, se desarrolla un *ataque uniforme*. Cuando un metal se coloca en un electrolito, algunas regiones resultan anódicas con respecto a otras; además, la ubicación de estas regiones cambia y hasta se invierte en ocasiones. Como las regiones anódicas y catódicas cambian continuamente, el metal se corroe de manera uniforme.

El *ataque galvánico* se presenta cuando ciertas áreas actúan siempre como ánodos, mientras que otras actúan siempre como cátodos. Estas celdas electroquímicas se denominan celdas galvánicas y pueden separarse en tres tipos: **celdas de composición**, **celdas de esfuerzo** y **celdas de concentración**.

Celdas de composición Las celdas de composición, o *corrosión metálica disímil*, aparecen cuando dos metales o aleaciones, por ejemplo cobre y hierro, forman una celda electrolítica. Debido al efecto de los elementos de aleación y de las concentraciones del electrolito en la polarización, las series fem pueden no decir cuáles regiones se corroen y cuáles están protegidas. En cambio, se usa una **serie galvánica**, en la que se clasifican las diferentes aleaciones en función de sus tendencias anódicas y catódicas en un ambiente en particular (tabla 23-2). Se puede hallar una serie galvánica diferente para el agua de mar, el agua dulce y las atmósferas industriales.

TABLA 23-2 ■ Serie galvánica para el agua de mar

Extremo anódico, activo	Aleaciones de magnesio y Mg
	Zinc
	Acero galvanizado
	Aluminio 5052
	Aluminio 3003
	Aluminio 1100
	Alclad
	Cadmio
	Aluminio 2024
	Acero al bajo carbono
	Hierro fundido
	Soldadura 50% Pb-50% Sn
	Acero inoxidable 316 (activo)
	Plomo
	Estaño
	Latón Cu-40% Zn
	Aleaciones base de níquel (activas)
	Cobre
	Aleación Cu-30% Ni
	Aleaciones base de níquel (pasivas)
	Aceros inoxidables (pasivos)
	Plata
	Titanio
	Grafito
	Oro
	Platino
	Extremo catódico, noble

(Según ASM Metals Handbook, vol. 10, 8a. ed., Copyright 1975 ASM International.)

El siguiente ejemplo es una ilustración de la serie galvánica.

Ejemplo 23-5

Corrosión en un acoplamiento de latón con soldadura

Un acoplamiento de latón utilizado en una aplicación marina se une con soldadura de plomo y estaño. ¿Sufrirá corrosión el latón o la soldadura?

SOLUCIÓN

De la serie galvánica, se encuentra que todas las aleaciones base de cobre son más catódicas que una soldadura 50% Pb-50% Sn. Entonces, la soldadura es el ánodo y se corroe. Del mismo modo, la corrosión de la soldadura puede contaminar con plomo el agua de los sistemas de tuberías de agua potable.

Las celdas de composición también se desarrollan en aleaciones de dos fases, donde una fase es más anódica que la otra. Como la ferrita es anódica con respecto a la cementita en el acero, pequeñas microceldas hacen que el acero se corra galvánicamente (figura 23-6). Casi siempre, una aleación de dos fases tiene menos resistencia a la corrosión que una aleación de una sola fase de composición similar.

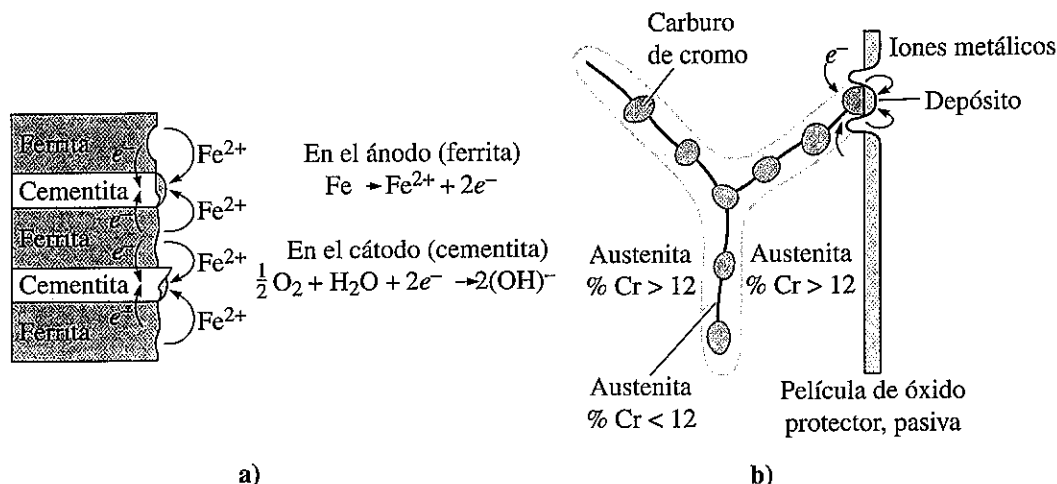


Figura 23-6 Ejemplo de celdas microgalvánicas en aleaciones de dos fases: a) En acero, la ferrita es anódica con respecto a la cementita. b) En acero inoxidable austenítico, la precipitación del carburo de cromo hace que sea anódica la austenita baja en Cr en los límites de grano.

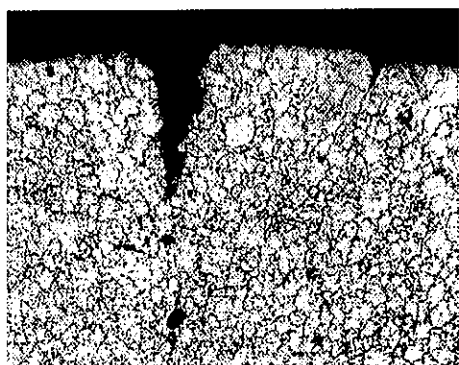


Figura 23-7 Microfotografía de corrosión intergranular en una pieza de zinc colada en matriz. La segregación de impurezas en los bordes de grano produce celdas de corrosión microgalvánicas (50x). (Reimpresa por cortesía de Don Askeland.)

La **corrosión intergranular** se presenta cuando el precipitado de una segunda fase o la segregación en los límites de grano producen una celda galvánica. En las aleaciones de zinc, por ejemplo, impurezas como el cadmio, estaño y plomo se segregan en los límites de grano durante la solidificación. Los límites de grano son anódicos en comparación con el resto de los granos, por lo que presentan corrosión del metal en el límite de granos (figura 23-7). En aceros inoxidables austeníticos, los carburos de cromo pueden precipitarse en los límites de granos [figura 23-6b)]. La formación de los carburos elimina cromo proveniente de la austenita adyacente a los límites. La austenita de bajo cromo (<12% Cr) en los límites de granos es anódica con respecto al resto de los granos y se presenta corrosión en los límites de granos. En ciertas aleaciones de aluminio trabajadas en frío, los límites de grano se corroen rápidamente debido a la presencia de precipitados perjudiciales. Esto hace que los granos de aluminio se desprendan como páginas u hojas de un libro, lo cual se conoce como exfoliación.

Celdas de esfuerzo Estas celdas se forman cuando un metal contiene regiones con diferentes esfuerzos locales. Las regiones con esfuerzos más elevados o de más alta energía actúan como ánodos con respecto a las áreas catódicas de menos esfuerzos (figura 23-8). Las regiones con tamaño de grano más pequeño, o de densidad más elevada de límites de grano,

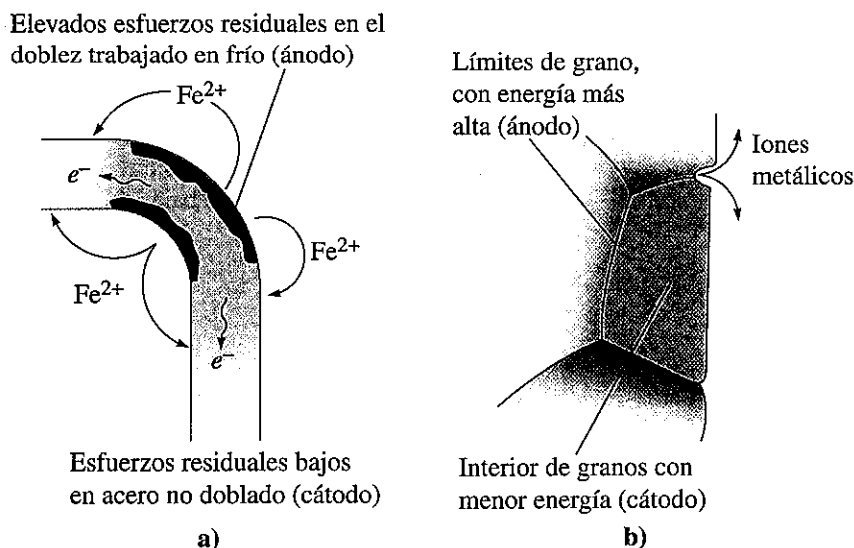


Figura 23-8 Ejemplos de celdas de esfuerzo. a) El trabajo en frío necesario para doblar una barra de acero introduce elevados esfuerzos residuales en el doblez, que entonces es anódico y se corroe. b) Como los límites de grano tienen gran energía, son anódicos y se corroen.

son anódicas con respecto a las regiones de granos gruesos del mismo material. Las áreas fuertemente trabajadas en frío son anódicas con respecto a las áreas menos trabajadas en frío.

La **corrosión por esfuerzo** se presenta por acción galvánica, pero también pueden presentarse otros mecanismos, como la adsorción de impurezas en la punta de una grieta existente. Ocurre una falla como resultado de corrosión y un esfuerzo aplicado. Mayores esfuerzos aplicados reducen el tiempo necesario para que se presente una falla.

Las fallas por fatiga también se inician o aceleran cuando hay corrosión. La **corrosión por fatiga** puede reducir las propiedades de fatiga al iniciar grietas (quizá al producir pequeñas hendiduras o huecos) y al aumentar la rapidez a la que se propagan las grietas.

Ejemplo 23-6

Corrosión de acero estirado en frío (trafilado)

Un alambre de acero estirado en frío se procesa para formar un clavo por deformación adicional, produciendo la punta en un extremo y la cabeza en el otro. ¿Dónde ocurrirá la corrosión más severa del clavo?

SOLUCIÓN

Como la cabeza y la punta han sido trabajadas en frío en una mayor cantidad en comparación con el cuerpo del clavo, la cabeza y la punta sirven como ánodos y se corroen más rápidamente.

Celdas de concentración

Las celdas de concentración aparecen debido a diferencias en la concentración del electrolito (figura 23-9). De acuerdo con la ecuación de Nernst, una diferencia en la concentración de iones metálicos ocasiona una diferencia en el

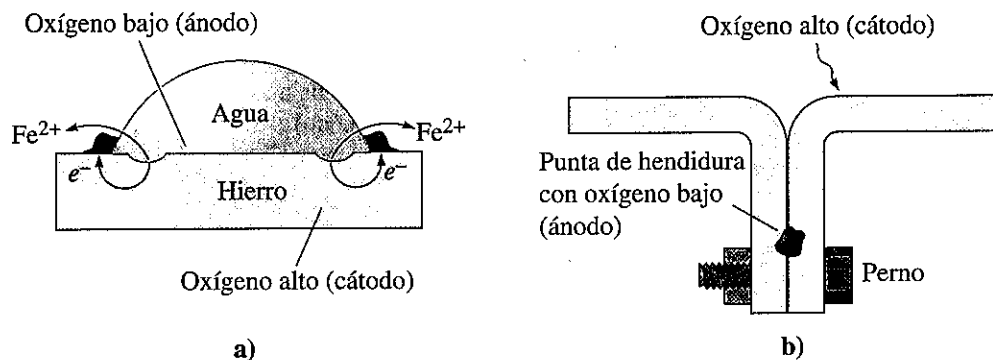


Figura 23-9 Celdas de concentración: a) Se presenta corrosión bajo una pequeña gota de agua en una placa de acero debido a la baja concentración de oxígeno en el agua. b) Se presenta corrosión en la punta de una hendidura por el limitado acceso a oxígeno.

potencial del electrodo. El metal en contacto con la solución más concentrada es el cátodo; el metal en contacto con la solución diluida es el ánodo.

La celda de concentración de oxígeno (a veces conocida como **escasez de oxígeno**) se presenta cuando la reacción catódica es el electrodo del oxígeno, $\text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2e^- \rightarrow 2(\text{OH})^-$. Los electrones fluyen de la región de bajo oxígeno, que sirve como el ánodo, a la región de alto oxígeno, que sirve como el cátodo.

Los depósitos, por ejemplo la herrumbre o las gotas de agua, protegen del oxígeno al metal base. En consecuencia, el metal bajo el depósito es el ánodo y se corroe. Esto causa una forma de corrosión por picaduras. La corrosión en la línea de flotación de embarcaciones es semejante. El metal arriba de la superficie del agua está expuesto al oxígeno, en tanto que el que está debajo de la línea del agua está privado de oxígeno; por tanto, se corroe el metal bajo la superficie. Normalmente, el metal muy alejado de la superficie del agua se corroe con más lentitud que el metal que está apenas bajo la superficie del agua debido a las diferencias en la distancia que deben recorrer los electrones. Debido a que las grietas y hendiduras tienen una menor concentración de oxígeno que la correspondiente base metálica, la punta de una grieta o hendidura es el ánodo, causando **corrosión por hendidura**.

Las tuberías enterradas en el suelo pueden corroerse por las diferencias en la composición del suelo. Las diferencias en rapidez pueden causar diferencias de concentración. El agua estancada contiene bajas concentraciones de oxígeno, mientras que las aguas de rápido movimiento y ventiladas contienen altas concentraciones de oxígeno. El metal cercano a aguas estancadas es anódico y se corroe. El siguiente es un ejemplo de corrosión debido al agua.

Ejemplo 23-7

Corrosión de acero engarzado

Dos piezas de metal se unen mecánicamente al engazar sus bordes. ¿Por qué sería esto una mala idea si el acero se expone al agua? Si el agua contiene sal, ¿se afectaría la corrosión?

SOLUCIÓN

Al engazar los bordes de acero, se produce una hendidura. La región en la hendidura está expuesta a menos aire y humedad, de modo que se comporta como el ánodo en una celda de concentración. El acero en la hendidura se corroe.

La sal aumenta la conductividad del agua, permitiendo que cargas eléctricas se transfieran con más rapidez. Esto causa una más alta densidad de corriente y, por tanto, más rápida corrosión debido a la menor polarización de resistencia.

Corrosión microbiana Varios microbios, por ejemplo hongos y bacterias, crean condiciones que estimulan la corrosión electroquímica. Especialmente en ambientes acuosos, estos organismos crecen en superficies metálicas y por lo general forman colonias que no son continuas. La presencia de colonias y los productos derivados del crecimiento de los organismos produce cambios en el ambiente y, por tanto, la rapidez a la que se presenta la corrosión.

Algunas bacterias reducen sulfatos en el ambiente, produciendo ácido sulfúrico, que a su vez ataca al metal. Las bacterias pueden ser aeróbicas (que se desarrollan cuando hay oxígeno) o anaeróbicas (que no necesitan oxígeno para crecer). Estas bacterias causan ataques en una diversidad de metales, incluyendo aceros, aceros inoxidables, aluminio y cobre, así como en algunos materiales cerámicos y en el concreto. Un ejemplo común se presenta en tanques de aluminio para combustible de aviones. Cuando el combustible, por lo general queroseno, está contaminado con humedad, crecen bacterias y excretan ácidos. Los ácidos atacan al aluminio, que en última instancia causan que el tanque de combustible tenga fugas.

El crecimiento de colonias de organismos en una superficie metálica lleva a la formación de celdas de concentración de oxígeno (figura 23-10). Las áreas bajo las colonias son anódicas, en tanto que las áreas no afectadas son catódicas. Además, las colonias de organismos reducen la rapidez de difusión del oxígeno hacia el metal, y los organismos tienden a consumir el oxígeno incluso si el oxígeno se difunde en la colonia. La celda de concentración produce fosas bajo las regiones cubiertas con los organismos. El crecimiento de los organismos, que puede incluir productos de la corrosión del metal, produce acumulaciones (llamadas **tubérculos**) que pueden obstruir tuberías o tapar sistemas de enfriamiento de agua en reactores nucleares, submarinos o reactores químicos.

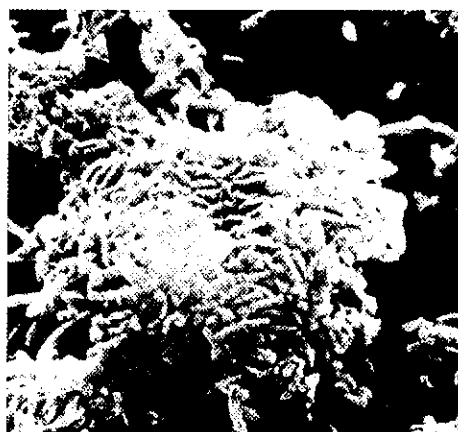
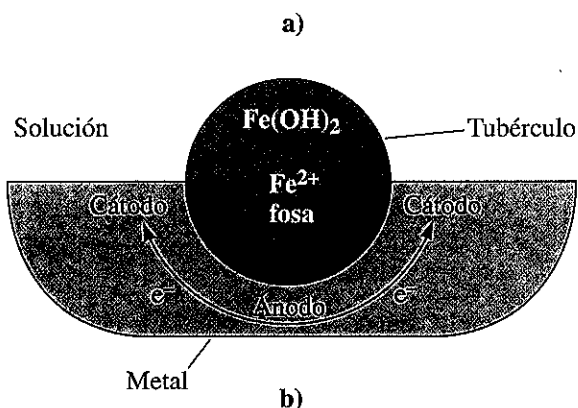


Figura 23-10

a) Celdas bacterianas que crecen en una colonia (2 700x). b) Formación de un tubérculo y una fosa bajo una colonia biológica. (Microfotografía reimpresa por cortesía de Donald Askeland.)



23-6 Protección contra corrosión electroquímica

Se utilizan diversas técnicas para combatir la corrosión, incluyendo el diseño y selección de materiales y el uso de recubrimientos, inhibidores, protección catódica y pasivación (estabilización).

Diseño Un adecuado diseño de estructuras metálicas puede hacer que la corrosión sea más lenta o incluso evitarla. Algunos de los pasos que deben tomarse para combatir la corrosión son los siguientes:

1. Impedir la formación de celdas galvánicas. Esto puede lograrse utilizando metales o aleaciones semejantes. Por ejemplo, es frecuente que tuberías de acero se conecten con conexiones de latón; esto produce una celda galvánica que hace que el acero se corroa. Con el uso de conexiones intermedias de plástico para aislar eléctricamente el acero y el latón, este problema puede reducirse al mínimo.
2. Hacer que el área del ánodo sea mucho mayor que el área del cátodo. Por ejemplo, pueden usarse remaches de cobre para sujetar láminas de acero. Debido a la pequeña área de los remaches de cobre, ocurre una reacción catódica limitada. El cobre acepta pocos electrones y la reacción anódica del acero continúa con lentitud. Por el contrario, si se usan remaches de acero para unir láminas de cobre, la pequeña área del ánodo de acero cede muchos electrones que son aceptados por el área grande del cátodo de cobre; la corrosión de los remaches de acero es muy rápida. Esto queda ilustrado en el siguiente ejemplo.

Ejemplo 23-8

Efecto de las áreas sobre la rapidez de corrosión para el par cobre-zinc

Considere un par de corrosión cobre-zinc. Si la densidad de corriente en el cátodo de cobre es de 0.05 A/cm^2 , calcule la pérdida de peso del zinc por hora si 1) el área catódica del cobre es de 100 cm^2 y el área anódica del zinc es de 1 cm^2 y 2) el área catódica del cobre es de 1 cm^2 y el área anódica del zinc es de 100 cm^2 .

SOLUCIÓN

Para la pequeña área anódica del zinc,

$$I = i_{\text{Cu}} A_{\text{Cu}} = (0.05 \text{ A/cm}^2)(100 \text{ cm}^2) = 5 \text{ A}$$

$$w_{\text{Zn}} = \frac{ItM}{nF} = \frac{(5)(3600)(65.38)}{(2)(96\,500)} = 6.1 \text{ g/h}$$

Para el área anódica grande del zinc,

$$I = i_{\text{Cu}} A_{\text{Cu}} = (0.05 \text{ A/cm}^2)(1 \text{ cm}^2) = 0.05 \text{ A}$$

$$w_{\text{Zn}} = \frac{ItM}{nF} = \frac{(0.05 \text{ A/cm}^2)(3600 \text{ s})(65.38 \frac{\text{g}}{\text{mol}})}{(2)(96\,500 \text{ C})} = 0.061 \text{ g/h}$$

La rapidez de corrosión del zinc se reduce considerablemente cuando el ánodo de zinc es mucho mayor que el cátodo.

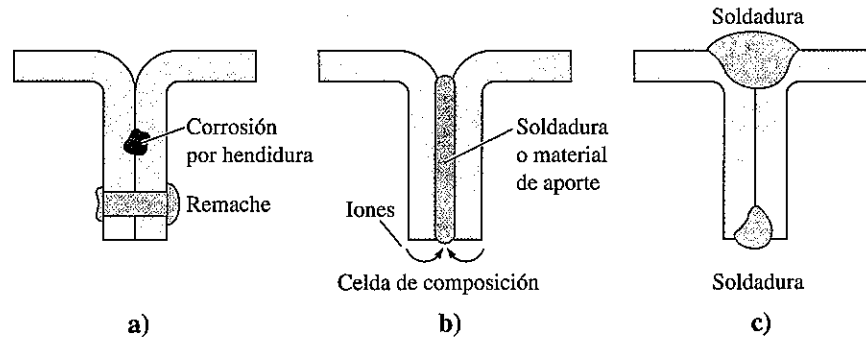


Figura 23-11 Métodos alternativos para unir dos piezas de acero: a) Los remaches pueden producir una celda de concentración, b) la soldadura con y sin aporte puede producir una celda de composición y c) la soldadura con metal de relleno comparable al metal base puede evitar la formación de celdas galvánicas.

3. Diseñe los componentes de modo que los sistemas de fluidos estén cerrados, no abiertos, para que no se acumulen charcos de agua estancada. Los depósitos parcialmente llenos sufren de corrosión por líneas de agua. Los sistemas abiertos disuelven continuamente gases, produciendo iones que participan en la reacción catódica y estimulan las celdas de concentración.
4. Evite hendiduras entre materiales ensamblados o unidos (figura 23-11). La soldadura puede ser una mejor técnica de unión que la soldadura fuerte, soldadura blanda o sujeción mecánica. Las celdas galvánicas se forman en la soldadura fuerte o soldadura blanda porque los metales de relleno tienen diferente composición a la del metal que se une. Los sujetadores mecánicos producen hendiduras generadas por celdas de concentración. Si el metal de relleno es muy semejante al metal base, la soldadura puede impedir la formación de estas celdas.
5. En algunos casos, la rapidez de corrosión no puede reducirse a un nivel que no interfiera con la duración esperada del componente. En tales casos, el ensamble debe estar diseñado en forma tal que la parte corroída pueda cambiarse fácil y económicamente.

Recubrimientos Los recubrimientos se utilizan para aislar las regiones anódicas y catódicas; también impiden la difusión de oxígeno o de vapor de agua que inicia la corrosión u oxidación. Los recubrimientos temporales, por ejemplo grasa o aceite, dan un poco de protección pero se disgregan con facilidad. Los recubrimientos orgánicos, como es el caso de pinturas, o de recubrimientos cerámicos, como esmaltes o vidrios, dan mejor protección pero, si el recubrimiento se disgrega, queda expuesto un pequeño lugar anódico que queda sometido a una corrosión rápida y localizada.

Los recubrimientos metálicos incluyen el acero estañado y galvanizado por inmersión en caliente (recubrimiento de zinc) (figura 23-12). Ya se examinó esto en capítulos anteriores sobre materiales ferrosos. Un recubrimiento continuo de un metal aísla al acero del electrolito; no obstante, cuando el recubrimiento sufre raspaduras, lo cual expone al acero base, el zinc continúa siendo efectivo porque es anódico al acero. Como el área del cátodo de acero expuesto es pequeña, el recubrimiento de zinc se corroe con gran lentitud y el acero permanece protegido. En contraste, el acero es anódico con respecto al estaño, de modo que se forma un pequeño ánodo de acero cuando se raspa el estaño, y posteriormente ocurre una rápida corrosión del acero.

Los recubrimientos por conversión química son producidos por una reacción química con la superficie. Líquidos, como las soluciones de ortofosfato de zinc ácido, forman una capa adherente de fosfato sobre la superficie del metal. Sin embargo, la capa de fosfato es muy porosa y se usa con mucha frecuencia para mejorar la adherencia de la pintura. Las capas de

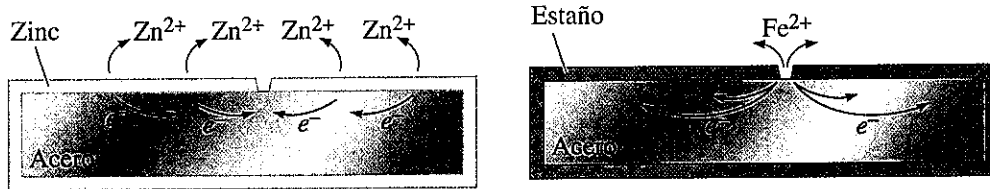


Figura 23-12 El acero recubierto con zinc y el acero estañado están protegidos de diferentes maneras. El zinc protege al acero incluso cuando desaparece el recubrimiento, dado que el zinc es catódico con respecto al acero. El estaño no protege al acero cuando el recubrimiento se disgrega porque el acero es anódico con respecto al estaño.

óxido estables, adherentes, no porosas, no conductoras se forman en la superficie de aluminio, cromo y acero inoxidable. Estos óxidos excluyen el electrolito e impiden la formación de celdas galvánicas. Componentes como los recipientes de reacción también se pueden recubrir con Teflón™ resistente a la corrosión o con otros plásticos.

Inhibidores Cuando se agregan al electrolito, algunos productos químicos emigran de preferencia hacia la superficie anódica o catódica produciendo polarización por concentración o por resistencia, es decir, son **inhibidores**. Las sales de cromato desempeñan esta función en radiadores de automóviles. Una diversidad de cromatos, fosfatos, molibdatos y nitritos producen películas protectoras en ánodos y cátodos en plantas de energía eléctrica y en intercambiadores de calor, “ahogando” así la celda electroquímica. Aun cuando el contenido exacto y el mecanismo por los que funciona no están claros, el conocido lubricante WD-40™ funciona por la acción de inhibidores. El nombre “WD-40™” significa “desplazamiento de agua” (de *water displacement WD*) que funcionó en el intento experimental número 40.

Protección catódica Se puede dar protección contra la corrosión si se suministran electrones al metal y se fuerza al metal a ser el cátodo (figura 23-13). La protección catódica puede utilizar un ánodo de sacrificio o un voltaje aplicado.

Un **ánodo de sacrificio** se une al material a proteger, formándose así un circuito electroquímico. El ánodo de sacrificio se corroe, cede electrones al metal y con ello impide una reacción anódica en el metal. El ánodo de sacrificio, por lo general de zinc o de magnesio, se consume y en última instancia debe ser cambiado. Entre sus aplicaciones se cuenta impedir la corrosión de tuberías enterradas, barcos, plataformas de perforación marinas y calentadores

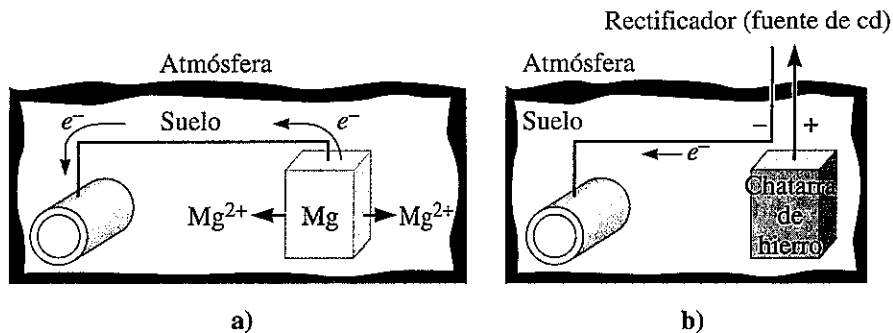


Figura 23-13 Protección catódica de una tubería de acero bajo tierra: a) Un ánodo de sacrificio construido de magnesio asegura que la celda galvánica haga que la tubería sea el cátodo. b) Un voltaje aplicado entre un ánodo auxiliar de chatarra de hierro y la tubería asegura que ésta sea el cátodo.

de agua. Una varilla de magnesio se usa en muchos calentadores de agua. El Mg sirve como ánodo y experimenta disolución, protegiendo así al acero contra la corrosión.

Se obtiene un **voltaje aplicado** de una fuente de corriente directa conectada entre un ánodo auxiliar y el metal a proteger. En esencia, se ha conectado una batería de modo que los electrones se muevan hacia el metal, causando que éste sea el cátodo. El ánodo auxiliar, por ejemplo chatarra de hierro, se corroe.

Protección anódica o pasivación Los metales situados cerca del extremo anódico de la serie galvánica son activos y sirven como ánodos en casi todas las celdas electrolíticas; no obstante, si se hace que estos metales sean más pasivos o más catódicos, se corroen con más lentitud de la normal. La **pasivación** resulta si se produce una fuerte polarización anódica que impida la reacción anódica normal; de aquí el término de protección anódica.

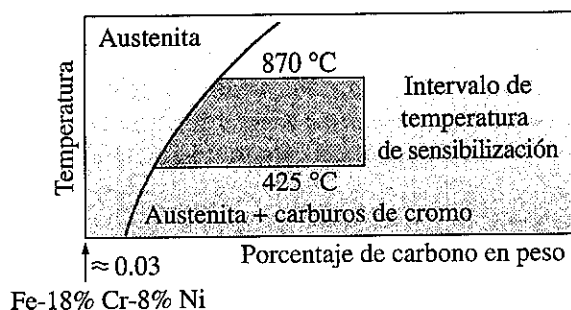
La pasivación se produce al exponer el metal a soluciones oxidantes altamente concentradas. Si una pieza de hierro se sumerge en un ácido nítrico muy concentrado, se corroe en forma rápida y uniforme para formar una delgada capa protectora de hidróxido de hierro. La capa protege al hierro de más corrosión en ácido nítrico.

También se puede generar pasivación si se aumenta el potencial en el ánodo arriba de un nivel crítico. Se forma una película pasiva en la superficie del metal, causando una fuerte polarización anódica, y la corriente disminuye a un nivel muy bajo. La pasivación del aluminio recibe el nombre de **anodizado**, y se produce una gruesa capa de óxido. Esta capa de óxido se puede teñir para obtener colores atractivos. La capa de óxido de Ta_2O_5 formada en alambres de tantalio se usa para fabricar capacitores.

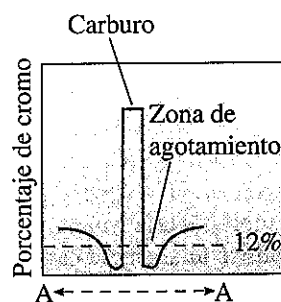
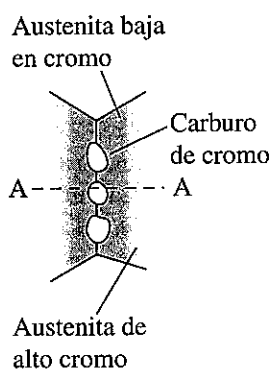
Selección y tratamiento de materiales La corrosión puede evitarse o reducirse al mínimo si se seleccionan materiales y tratamientos térmicos apropiados. En piezas de fundición, por ejemplo, la segregación produce celdas galvánicas localizadas, muy pequeñas, que aceleran la corrosión. Se puede mejorar la resistencia a la corrosión con un tratamiento térmico de homogeneización. Cuando se fabrican metales en formas terminadas por dobleces, las diferencias en la cantidad de trabajo en frío y los esfuerzos residuales generan celdas de esfuerzo locales. Éstas se pueden reducir al mínimo por medio de un recocido de alivio de esfuerzos o un recocido completo de recristalización.

El tratamiento térmico es particularmente importante en aceros inoxidables austeníticos (figura 23-14). Cuando el acero se enfría lentamente de 870 a 425 °C, los carburos de cromo se precipitan en los límites de grano. En consecuencia, la austenita en los límites de grano puede contener menos de 12% de cromo, que es el mínimo requerido para producir una capa pasiva de óxido. El acero queda **sensibilizado**. Como las regiones del límite de grano son pequeñas y altamente anódicas, se presenta una rápida corrosión de la austenita en los límites de grano. Por medio de varias técnicas se puede reducir al mínimo el problema.

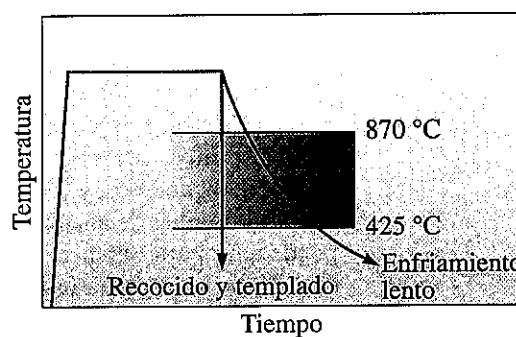
1. Si el acero contiene menos de 0.03% de C, no se forman carburos de cromo.
2. Si el porcentaje de cromo es muy alto, es posible que la austenita no se agote a menos del 12% de Cr, incluso si se forman carburos de cromo.
3. La adición de titanio o niobio fija el carbono como TiC o NbC, impidiendo la formación de carburo de cromo. Se dice que el acero está **estabilizado**.
4. El intervalo de temperatura de sensibilización, de 425 a 870 °C, debe evitarse durante la manufactura y servicio.
5. En un tratamiento térmico de **recocido y templado**, el acero inoxidable se calienta arriba de 870 °C, con lo que se disuelven los carburos de cromo. La estructura, que en esta forma contiene 100% de austenita, se temple rápidamente para impedir la formación de carburos.



a)



b)



c)

Figura 23-14 a) Los aceros inoxidable austeníticos se convierten en sensibilizados cuando se enfrían lentamente en el intervalo de temperatura entre 870 y 425 °C. b) Un enfriamiento lento permite que se precipiten carburos de cromo en los límites de grano; se agota el contenido de cromo local. c) El recocido y temple para disolver los carburos puede impedir la corrosión entre granos.

Los ejemplos siguientes ilustran el diseño de un sistema de protección contra la corrosión.

Ejemplo 23-9

Diseño de un sistema de protección contra la corrosión

En un campo se instalan canales de acero para dar de beber a un rebaño de ganado. Es frecuente que los canales se oxiden y deban ser cambiados. Diseñe un sistema para evitar o retardar este problema.

SOLUCIÓN

Es probable que los canales sean de acero al bajo carbono y sin aleación, con ferrita y cementita, lo cual produce una celda de composición. La línea del agua en el canal, que está parcialmente lleno de agua, produce una celda de concentración. El canal también está expuesto al medio ambiente y el agua está contaminada con impurezas. En consecuencia, es de esperarse la corrosión del depósito de acero no protegido.

Podrían usarse varios métodos para evitar o retardar la corrosión. Se podría, por ejemplo, fabricar el canal usando acero inoxidable o aluminio. Cualquiera de éstos ten-

dría mejor resistencia a la corrosión que el acero simple al carbono, pero ambos serían considerablemente más costosos que el material actual.

Se podría sugerir el uso de protección catódica, con un pequeño ánodo de magnesio conectado en el interior del canal. El ánodo se corroe por sacrificio y previene la corrosión del acero. Esto haría necesario que el operador de la granja regularmente revisara el tanque para asegurarse de que el ánodo no se consuma por completo; también es deseable asegurarse de que los iones de magnesio introducidos en el agua no sean un riesgo para la salud.

Otro método sería proteger el canal de acero con un recubrimiento apropiado. Pintar el acero (es decir, introducir un recubrimiento de polímero protector) o usar un acero estañado daría protección siempre que el recubrimiento no se disuelva.

El método más adecuado es usar un acero galvanizado, aprovechando el recubrimiento protector y el comportamiento por sacrificio del zinc. La corrosión es muy lenta debido al tamaño grande del área del ánodo, incluso si el recubrimiento se disuelve. Además, el acero galvanizado es de un costo relativamente bajo, se puede obtener con facilidad y no requiere de frecuente inspección.

Ejemplo 23-10

Diseño de una soldadura para acero inoxidable

Un sistema de tuberías utilizado para el transporte de un líquido corrosivo está fabricado de acero inoxidable 304. Es necesario soldar los tubos para ensamblar el sistema. Desafortunadamente, se presenta corrosión y el líquido corrosivo se fuga de los tubos cerca de la soldadura. Identifique el problema y diseñe un sistema para evitar la corrosión en el futuro.

SOLUCIÓN

La tabla 13-4 muestra que el acero inoxidable 304 contiene 0.08% C, lo cual hace que el acero sea sensibilizado si no se calienta o se enfría en forma apropiada durante la operación de soldadura. La figura 23-15 muestra las temperaturas máximas alcanzadas en la fusión y las zonas afectadas por el calor durante la soldadura. Una parte de la tubería

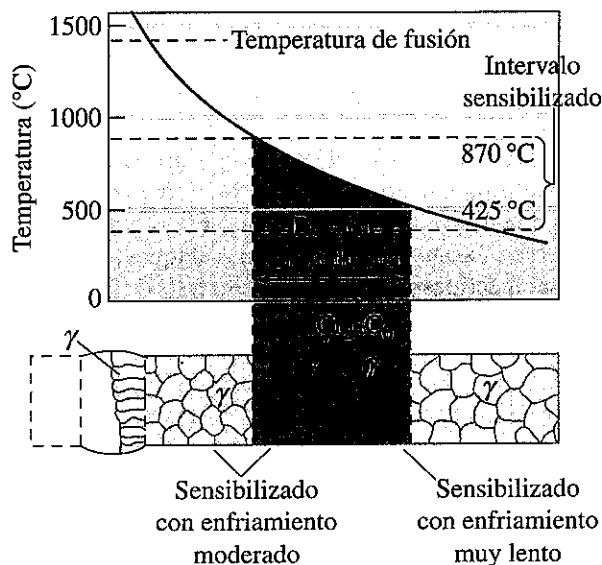


Figura 23-15

Temperatura máxima en la cercanía de una soldadura de acero inoxidable y estructura sensibilizada producida cuando la soldadura se enfría lentamente (para el ejemplo 23-10).

afectada por el calor se calienta a la temperatura de sensibilización, lo cual permite que se precipiten carburos de cromo. Si el enfriamiento de la soldadura es muy lento, la zona de fusión y otras partes de la zona afectada por el calor también pueden resultar afectadas. La sensibilización de la zona soldada, por tanto, es la probable causa para que el tubo se corroa.

Se pueden considerar varias soluciones para este problema. Se podría usar un proceso de soldadura que permita una muy rápida entrada de calor, haciendo que la soldadura se caliente y se enfríe muy rápidamente. Si el acero se expone al intervalo de temperatura de sensibilización sólo durante un tiempo muy breve, es posible que no se precipiten carburos de cromo. Los procesos de unión como la soldadura con láser o con haz de electrones son de muy rápida entrada de calor, pero son costosos. Además, la soldadura por haz de electrones requiere el uso de un vacío y puede no ser factible para ensamblar el sistema de tuberías en una cámara de vacío.

Se podría dar tratamiento térmico al conjunto una vez hecha la soldadura. Al ejecutar un recocido y templado, cualquier carburo que se haya precipitado vuelve a disolverse durante el recocido y no se forma de nuevo durante el templado, pero puede no ser posible realizar este tratamiento en un conjunto de grandes dimensiones.

Se podría revisar el procedimiento original de soldadura para determinar si la tubería fue precalentada antes de la unión, para reducir al mínimo el desarrollo de esfuerzos debidos al proceso de soldadura. Si la tubería fue calentada previamente, es más probable que se presente la sensibilización. Se recomienda suspender cualquier procedimiento de precalentamiento.

Quizá el mejor diseño sea el uso de un acero inoxidable que no esté sujeto a la sensibilización. Por ejemplo, no se precipitan carburos en un acero inoxidable 304L, que contiene menos de 0.03% C. Los aceros inoxidables al bajo carbono son más costosos que el acero 304 normal; no obstante, el costo adicional evita la corrosión e incluso nos permite usar técnicas convencionales de unión.

23-7

Degradación microbiana y polímeros biodegradables

Una forma de "corrosión" de polímeros es el ataque de una diversidad de insectos y microbios. Los polímeros relativamente simples (como el polietileno, polipropileno y poliestireno), los polímeros de alto peso molecular, los polímeros cristalinos y los termoeestables son relativamente inmunes a ataques.

Algunos polímeros, incluyendo los poliésteres, poliuretanos, celulósicos y el cloruro de polivinilo plastificado, que contiene aditivos para reducir el grado de polimerización, son particularmente vulnerables a la degradación microbiana. Estos polímeros pueden descomponerse en moléculas de bajo peso molecular por radiación o ataque químico hasta que sean suficientemente pequeñas para ser ingeridas por microbios.

Se aprovecha el ataque microbiano para la producción de polímeros *biodegradables*, ayudando así a eliminar material de la corriente de desperdicios. La biodegradación requiere la completa conversión del polímero en dióxido de carbono, agua, sales inorgánicas y otros pequeños productos derivados por la ingesta del material por bacterias. Los polímeros celulósicos pueden descomponerse con facilidad en moléculas con bajos pesos moleculares y por tanto son biodegradables. Además, se producen polímeros especiales que se degradan con rapidez; un copolímero de polietileno y almidón es un ejemplo. Las bacterias atacan la parte del almidón del polímero y reducen el peso molecular del polietileno restante. Otros ciertos polímeros como el policaprolactano (PCL), el ácido poliláctico (PLA) y el ácido glicólico poliláctico (PLGA) son útiles en diversas aplicaciones biomédicas por ejemplo en suturas.

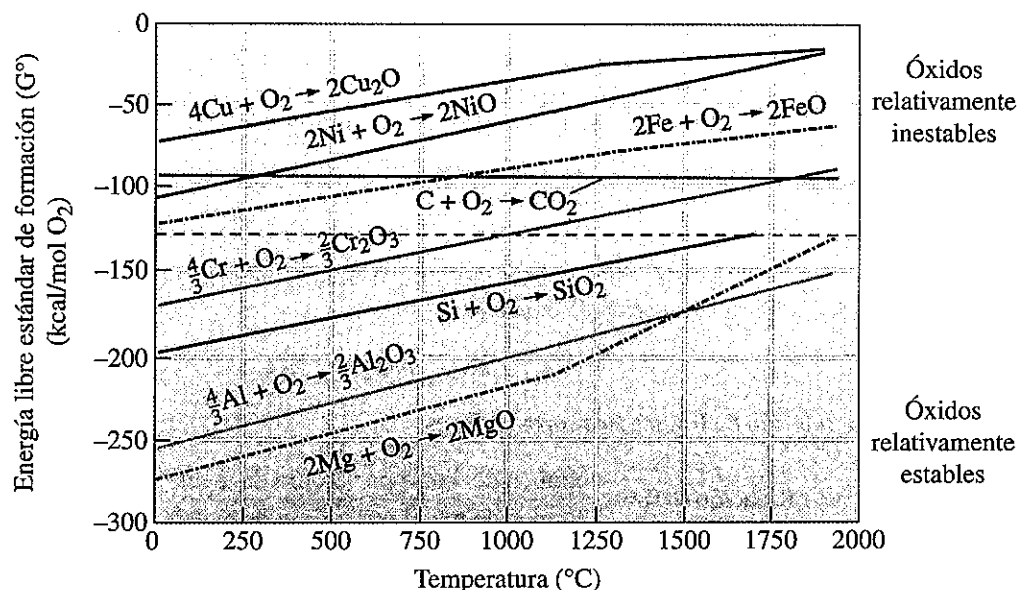


Figura 23-16 Energía libre estándar de formación de óxidos seleccionados como función de la temperatura. Una energía libre negativa grande indica un óxido más estable.

23-8 Oxidación y otras reacciones gaseosas

Materiales de todo tipo pueden reaccionar con oxígeno y otros gases. Estas reacciones pueden, al igual que la corrosión, alterar la composición, propiedades o integridad de un material. Como ya se dijo antes, los metales como el Al y Ti reaccionan muy fácilmente con el oxígeno.

Oxidación de metales Los metales pueden reaccionar con el oxígeno para producir un óxido en la superficie. Interesan tres aspectos de esta reacción: la facilidad con la que se oxida el metal, la naturaleza de la película de óxido que se forma y la rapidez con la que ocurre la oxidación.

La facilidad con la que ocurre la oxidación está dada por la energía libre estándar de formación para el óxido. La energía libre estándar de formación para un óxido puede determinarse a partir de un diagrama de Ellingham, como el que se muestra en la figura 23-16 y que además presenta que hay una fuerza grande de activación para la oxidación de magnesio y aluminio, en comparación con la oxidación de níquel o cobre. Esto se ilustra en el siguiente ejemplo.

Ejemplo 23-11 Alación de acero a base de cromo

Explique por qué no se deben agregar elementos de aleación como el cromo al arrabio, antes de que éste se convierta en acero en un horno básico de oxígeno a $1700^\circ C$.

SOLUCIÓN

En un horno básico de oxígeno, se baja el contenido de carbono del metal de alrededor de 4% a mucho menos del 1% si se sopla oxígeno a través del metal fundido. Si antes de

empezar la fabricación de acero ya se tuviera cromo, éste se oxidaría antes que el carbono (figura 23-16), puesto que el óxido de cromo tiene una menor energía libre de formación (o es más estable) que el dióxido de carbono (CO_2). Así, cualquier cantidad de cromo agregado, de alto precio, se perdería antes de remover el carbono del arrabio.

El tipo de película de óxido influye en la rapidez a la que ocurre la oxidación (figura 23-17). Para la **reacción de oxidación**



la **relación de Pilling-Bedworth (P-B)** es

$$\text{Relación P-B} = \frac{\text{volumen de óxido por átomo de metal}}{\text{volumen de metal por átomo de metal}} = \frac{(M_{\text{óxido}})(\rho_{\text{metal}})}{n(M_{\text{metal}})(\rho_{\text{óxido}})} \quad (23-13)$$

donde M es la masa atómica o molecular, ρ es la densidad y n es el número de átomos de metal en el óxido, como se define en la ecuación 23-12.

Si la relación de Pilling-Bedworth es menor a uno, el óxido ocupa un volumen menor que el metal del cual se forma; el recubrimiento, por tanto, es poroso y la oxidación continúa rápidamente, lo cual es característico en metales como el magnesio. Si la relación es de uno a dos, los volúmenes de óxido y metal son semejantes y se forma una película protectora, no

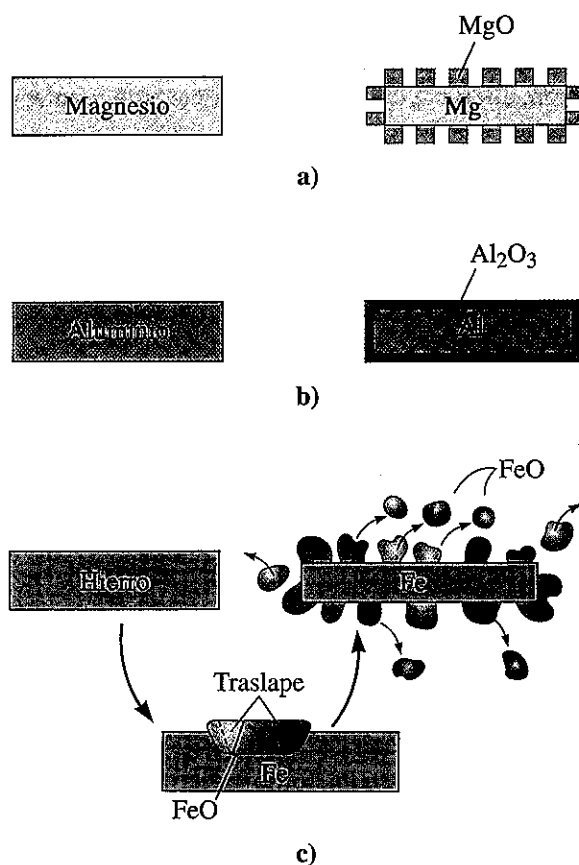


Figura 23-17

Dependiendo de la relación de volúmenes entre metal y óxido, pueden formarse tres tipos de óxidos: a) el magnesio produce una película de óxido porosa, b) el aluminio forma una película de óxido protectora, adherente, no porosa y c) el hierro forma una película de óxido que se desprende de la superficie y proporciona una protección deficiente.

porosa, característica del aluminio y el titanio. Si la relación es mayor a dos, el óxido ocupa un volumen más grande y puede desprenderse de la superficie, exponiendo metal fresco que continúa oxidándose, lo cual es característico del hierro. Aun cuando la ecuación de Pilling-Bedworth se ha empleado históricamente para caracterizar el comportamiento del óxido, se observan numerosas excepciones a este comportamiento. El uso de la relación P-B se ilustra en el siguiente ejemplo.

Ejemplo 23-12 Relación de Pilling-Bedworth

La densidad del aluminio es de 2.7 g/cm^3 y la del Al_2O_3 es de unos 4 g/cm^3 . Describa las características de la película de óxido de aluminio. Compare con la película de óxido que se forma en el tungsteno. La densidad del tungsteno es de 19.254 g/cm^3 y la del WO_3 es de 7.3 g/cm^3 .

SOLUCIÓN

Para $2\text{Al} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$, el peso molecular del Al_2O_3 es de 101.96 g/mol y la del aluminio es de 26.981 g/mol .

$$\text{P-B} = \frac{M_{\text{Al}_2\text{O}_3} \rho_{\text{Al}}}{n M_{\text{Al}} \rho_{\text{Al}_2\text{O}_3}} = \frac{\left(101.96 \frac{\text{g}}{\text{mol}}\right) (2.7 \text{ g/cm}^3)}{(2) \left(26.981 \frac{\text{g}}{\text{mol}}\right) (4 \text{ g/cm}^3)} = 1.28$$

Para el tungsteno, $\text{W} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{WO}_3$. El peso molecular del WO_3 es de 231.85 g/mol y el del tungsteno es de 183.85 g/mol .

$$\text{P-B} = \frac{M_{\text{WO}_3} \rho_{\text{W}}}{n M_{\text{W}} \rho_{\text{WO}_3}} = \frac{\left(231.85 \frac{\text{g}}{\text{mol}}\right) (19.254 \text{ g/cm}^3)}{(1) \left(183.85 \frac{\text{g}}{\text{mol}}\right) (7.3 \text{ g/cm}^3)} = 3.33$$

Como $\text{P-B} \approx 1$ para el aluminio, la película de Al_2O_3 es no porosa y adherente, que da protección al aluminio subyacente. Como $\text{P-B} > 2$ para el tungsteno, el WO_3 debe ser no adherente y no protector.

La rapidez a la que ocurre la oxidación depende del acceso de oxígeno a los átomos de metal. Se presenta una rapidez lineal de oxidación cuando el óxido es poroso (como en el magnesio) y el oxígeno tiene un acceso continuo a la superficie metálica:

$$y = kt \quad (23-14)$$

donde y es el grosor del óxido, t es el tiempo y k es una constante que depende del metal y de la temperatura.

Cuando la difusión de iones o electrones a través de una capa de óxido no porosa es el factor de control, se observa una relación parabólica. Esta relación se observa en el hierro, cobre y níquel:

$$y = \sqrt{kt} \quad (23-15)$$

Por último, en el caso del crecimiento de películas delgadas de óxido que son particularmente protectoras, por ejemplo el aluminio y posiblemente el cromo, se observa una relación logarítmica:

$$y = k \ln(ct + 1) \quad (23-16)$$

donde k y c son constantes para una temperatura, ambiente y composición particulares. El ejemplo que sigue muestra el cálculo del tiempo necesario para que una lámina de níquel se oxide por completo.

Ejemplo 23-13

Curva parabólica de oxidación para el níquel

A 1000 °C, el níquel puro sigue una curva parabólica de oxidación dada por la constante $k = 3.9 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$ en una atmósfera de oxígeno. Si esta relación no la afecta el grosor de la película de óxido, calcule el tiempo necesario para que una lámina de 0.1 cm de grueso se oxide por completo.

SOLUCIÓN

Si supone que la lámina se oxida en ambos lados:

$$y = \sqrt{kt} = \sqrt{\left(3.9 \times 10^{-12} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}\right)(t)} = \frac{0.1 \text{ cm}}{2 \text{ lados}} = 0.05 \text{ cm}$$

$$t = \frac{(0.05 \text{ cm})^2}{3.9 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}} = 6.4 \times 10^8 \text{ s} = 20.3 \text{ años}$$

La temperatura también afecta la rapidez de oxidación. En muchos metales, esta rapidez es controlada por la intensidad de difusión de los iones oxígeno o metal a través del óxido. Si la difusión del oxígeno es más rápida, ocurre oxidación entre el óxido y el metal; si la difusión de iones metal es más rápida, ocurre oxidación en la interfaz entre el óxido y la atmósfera. En consecuencia, se espera que la rapidez de oxidación siga una relación de Arrhenius, incrementándose en forma exponencial a medida que aumenta la temperatura.

Oxidación y degradación térmica de polímeros Los polímeros se degradan si se les calienta y/o se exponen al oxígeno. Una cadena polimérica puede romperse, produciendo dos macrorradicales. En termoeestables rígidos, los macrorradicales pueden recombinarse instantáneamente (proceso conocido como efecto de *jaula*), con el resultado en que no hay cambio neto en el polímero. En los termoplásticos más flexibles, en particular para polímeros amorfos más que cristalinos, no ocurre recombinación y el resultado es un descenso en el peso molecular, viscosidad y propiedades mecánicas del polímero. La despolimerización continúa conforme el polímero es expuesto a temperaturas elevadas. Las cadenas poliméricas también se pueden *separar*, en cuyo caso los monómeros individuales se eliminan uno tras otro de los extremos de la cadena, gradualmente reduciendo el peso molecular de las cadenas restantes. A medida que disminuye el grado de polimerización, las cadenas restantes se hacen cada vez más ramificadas o puede ocurrir ciclización. En la *ciclización*, los dos extremos de la misma cadena pueden unirse para formar un anillo.

Los polímeros también se degradan por la pérdida de grupos laterales de la cadena. Los iones de cloro [en el cloruro de polivinilo (PVC)] y anillos de benceno (en el poliestireno) se pierden de la cadena, formando productos derivados. Por ejemplo, a medida que se degrada el cloruro de polivinilo, se produce ácido hidróclorico (HCl). Los átomos de hidrógeno están enlazados con más fuerza a las cadenas; así, el polietileno no se degrada con la misma facilidad que el PVC o el poliestireno. Los iones de fluoruro (en el Teflón™) son más difíciles de remover que los átomos de hidrógeno, lo que da al Teflón™ su alta resistencia a la temperatura. Como ya se mencionó aquí antes, la degradación de polímeros como PCL, PLGA y PLA, en realidad puede ser útil para ciertas aplicaciones biomédicas (por ejemplo suturas que se disuelven) y también en el desarrollo de productos que no dañan el ambiente.

23-9 Desgaste y erosión

El desgaste y la erosión eliminan material de un componente por ataque mecánico de sólidos o líquidos. La corrosión y falla mecánica también contribuyen a este tipo de ataque.

Desgaste adhesivo El desgaste adhesivo, también conocido como rayado, excoiación o agarrotamiento, se presenta cuando dos superficies sólidas se deslizan una sobre otra bajo presión. Las salientes de una superficie, o asperezas, se deforman plásticamente y al final quedan soldadas entre sí por las altas presiones locales (figura 23-18). A medida que continúe el deslizamiento, estos enlaces se rompen y producen cavidades en una superficie, salientes en la segunda superficie y frecuentemente diminutas partículas abrasivas, todas las cuales contribuyen a más desgaste de las superficies.

Deben considerarse numerosos factores cuando se trata de mejorar la resistencia al desgaste en materiales. Es posible evitar el desgaste por adhesiones que causan la pérdida de material, si se diseñan componentes de modo que las cargas sean pequeñas, las superficies sean lisas y haya lubricación continua.

También son importantes las propiedades y la microestructura del material. Normalmente, si ambas superficies tienen alta dureza, la rapidez de desgaste es baja. Una elevada resistencia, para ayudar a resistir cargas aplicadas, así como buena robustez y ductilidad, que evitan el desgarre de material de la superficie, son factores benéficos. Se espera que los materiales cerámicos, con su excepcional dureza, tengan buena resistencia al desgaste adhesivo.

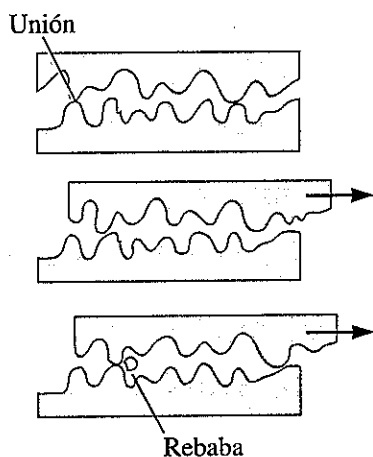


Figura 23-18

Las asperezas en dos superficies rugosas pueden unirse al principio, pero una fuerza suficientemente grande rompe la unión y las superficies se deslizan entre sí. Conforme esto último ocurre, las asperezas pueden fracturarse, desgastar las superficies y producir partículas o rebabas.

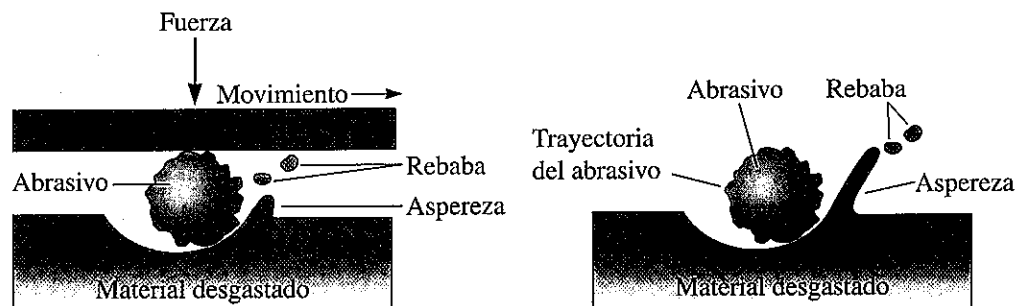


Figura 23-19 El desgaste abrasivo, causado ya sea por abrasivos atrapados o libres, produce depresiones en el material y acumula asperezas que pueden fracturarse en pequeñas rebabas.

La resistencia de polímeros al desgaste puede mejorarse si el coeficiente de fricción se reduce por la adición de politetrafluoretileno (Teflón™), o si el polímero es reforzado por la introducción de fibras de refuerzo como vidrio, carbono o aramidas.

Desgaste abrasivo Cuando se elimina material de una superficie por contacto con partículas duras, se presenta el **desgaste abrasivo**. Puede haber partículas en la superficie de un segundo material o pueden existir como partículas sueltas entre las dos superficies (figura 23-19). Este tipo de desgaste es común en maquinaria como arados, cuchillas de niveladoras, trituradoras y molinos usados para manejar materiales abrasivos y puede presentarse también cuando partículas duras se introducen de manera no intencional en partes móviles de maquinaria. El desgaste abrasivo también se usa para operaciones de maquinado con el fin de eliminar material de manera intencional. En innumerables aplicaciones automotrices (por ejemplo amortiguadores, engranajes, pistones y cilindros), el comportamiento del desgaste abrasivo es una preocupación importante.

Los materiales de alta dureza, buena tenacidad y elevada resistencia al calor son los más resistentes al desgaste abrasivo. Entre los materiales comunes que se usan para aplicaciones de desgaste abrasivo se cuentan los aceros templados y revenidos; aceros cementados o superficies endurecidas superficialmente; aleaciones de cobalto como Stallite; materiales compuestos, incluyendo materiales metal cerámicos (cermet) de carburo de tungsteno; piezas de hierro fundido blanco y superficies duras producidas por soldadura. La mayor parte de los materiales cerámicos también resisten el desgaste de manera eficiente por su alta dureza, pero su fragilidad a veces limita su utilidad en condiciones de desgaste abrasivo.

Erosión líquida La integridad de un material puede quedar destruida por la erosión causada por altas presiones originadas por un líquido en movimiento. El líquido produce endurecimiento por deformación en la superficie metálica, lo cual lleva a deformación localizada, agrietamiento y pérdida de material. Dos tipos de erosión líquida merecen mencionarse.

La **cavitación** se presenta cuando un líquido que contiene un gas disuelto penetra en una región de baja presión. Las burbujas de gas, que se precipitan y crecen en el líquido en el entorno de baja presión, se colapsan cuando la subsiguiente presión aumenta. La alta presión, que es una onda de choque local que se produce por el colapso puede ejercer una presión de miles de atmósferas contra el material circundante. La cavitación se encuentra con frecuencia en hélices, presas y vertederos, así como en bombas hidráulicas.

La **colisión líquida** ocurre cuando gotitas líquidas llevadas en un gas de rápido movimiento inciden sobre una superficie metálica. Se forman altas presiones localizadas debido al impacto inicial y al rápido movimiento lateral de las gotitas desde el punto de impacto a lo

largo de la superficie metálica. Las gotitas de agua llevadas por vapor pueden erosionar los álabes de turbinas de generadores de vapor y en plantas nucleares para generación de energía eléctrica.

La erosión líquida puede minimizarse por medio de una adecuada selección de materiales y diseño. Reducir al mínimo la velocidad del líquido, asegurar que el líquido no tenga aire, seleccionar materiales duros y tenaces para absorber el impacto de las gotitas, así como recubrir el material con un elastómero para absorción de energía, ayuda en su conjunto a reducir al mínimo la erosión.

Resumen

- Alrededor de 6% del producto interno bruto de Estados Unidos se utiliza para combatir la corrosión. La corrosión causa el deterioro de todo tipo de materiales. Diseñadores e ingenieros deben saber cómo ocurre la corrosión para considerar diseños, seleccionar materiales o tomar medidas de protección adecuadas.
- En la corrosión química, un material se disuelve en un solvente, lo que resulta en pérdida del material. Todos los materiales, ya sea metales, cerámicos, polímeros y compuestos, están sujetos a esta forma de ataque. La selección de materiales apropiados que tengan una baja solubilidad en un disolvente determinado, o el uso de recubrimientos inertes en materiales, ayuda a evitar o reducir la corrosión química.
- La corrosión electroquímica requiere formar un circuito eléctrico completo. El ánodo se corroe y en el cátodo se forma un subproducto como la herrumbre. Debido a que se requiere de un circuito eléctrico, esta forma de corrosión es más seria en metales y aleaciones.
- Se forman celdas de composición por la presencia de dos metales diferentes, dos fases distintas dentro de una sola aleación o incluso segregación dentro de una sola fase.
- Las celdas de esfuerzo se forman cuando el nivel de esfuerzos residuales o aplicados varía dentro del metal; las regiones sujetas al esfuerzo más alto son anódicas y, en consecuencia, se corroen. El agrietamiento por corrosión por esfuerzo y fatiga por corrosión son ejemplos de celdas de esfuerzo.
- Se forman celdas de concentración cuando un metal queda expuesta a un electrolito no uniforme; por ejemplo, se corroe la parte de un metal expuesto al contenido más bajo de oxígeno. La corrosión por fosas, corrosión en la línea de agua o de flotación y la corrosión por hendiduras son ejemplos de estas celdas. La corrosión microbiana, en la que colonias de organismos como bacterias crecen en la superficie, es otro ejemplo de una celda de concentración.
- La corrosión electroquímica se puede evitar o reducir al mínimo con el uso de aislantes eléctricos para abrir el circuito eléctrico, diseñando y manufacturando conjuntos sin hendiduras, diseñando conjuntos de modo que el área del ánodo sea grande en comparación con la del cátodo, usando recubrimientos de protección y hasta de sacrificio, inhibiendo la acción del electrolito, suministrando electrones al metal por medio de un voltaje aplicado, usando tratamientos térmicos que reducen los esfuerzos residuales o la segregación, y un sinnúmero de otras acciones.
- La oxidación degrada casi todos los materiales. Si bien un recubrimiento de óxido proporciona protección para algunos metales como el aluminio, casi todos los materiales son

atacados por el oxígeno. Muchas veces es importante la difusión de oxígeno y de átomos metálicos; por tanto, la oxidación ocurre con más rapidez a temperaturas elevadas.

- Otros factores, por ejemplo el ataque de microbios, daños causados por radiación, así como desgaste o erosión de un material, también pueden causar que un material se deteriore.

Glosario

Anodizado Técnica de protección anódica en la que se produce deliberadamente una gruesa capa de óxido sobre una superficie metálica.

Ánodo Lugar donde ocurre la corrosión al ceder electrones y iones en una celda electroquímica.

Ánodo de sacrificio Protección catódica mediante la cual al material que se ha de proteger se le conecta eléctricamente un material más anódico. El ánodo se corroe para proteger el material deseado.

Cátodo Lugar donde los electrones son aceptados y se genera un subproducto durante la corrosión electroquímica.

Cavitación Erosión en la superficie de un material debido a presiones causadas al colapsarse una burbuja de gas dentro de un líquido en movimiento.

Celda electroquímica Celda en la que electrones y iones pueden moverse por trayectorias diferentes entre dos metales, produciendo una corriente que, a su vez, origina la corrosión o chapado.

Celdas de composición Celdas de corrosión electroquímica entre dos materiales de diferente composición. También se conocen como celdas galvánicas.

Celdas de concentración Celdas de corrosión electroquímica producidas entre dos lugares de un material en los que la composición del electrolito es diferente.

Celdas de esfuerzo Celdas de corrosión electroquímica producida por diferencias en esfuerzos residuales o aplicados en distintos lugares dentro del material.

Colisión líquida Erosión de un material causada por el impacto de gotitas de líquido llevadas por una corriente de gas.

Corrosión electroquímica Corrosión producida por la generación de una corriente en una celda electroquímica y que remueve iones del metal.

Corrosión grafitica Proceso especial de corrosión química mediante el que se lixivia el hierro de la fundición de hierro, dejando tras de sí una masa de grafito esponjosa y débil.

Corrosión intergranular Corrosión en los límites de grano debida a que la segregación o la precipitación de los mismos produce celdas galvánicas.

Corrosión por esfuerzo Deterioro de un material en el que un esfuerzo aplicado acelera la rapidez de corrosión.

Corrosión por hendiduras Celda de concentración especial en la que se presenta corrosión debido a la baja concentración de oxígeno.

Corrosión química Remoción de átomos de un material por medio de solubilidad o reacción química entre el material y el líquido circundante.

Desgaste abrasivo Remoción de material en superficies debido a la acción cortante de partículas.

Desgaste adhesivo Remoción de material en superficies debido a una unión local momentánea, seguida por la fractura de la unión en la superficie.

Deszincificado Proceso especial de corrosión química por medio del cual los átomos de zinc y de cobre se separan del latón, pero el cobre vuelve a depositarse sobre el metal.

Ecuación de Faraday Relación que describe la rapidez con la que ocurre una corrosión o galvanización en una celda electroquímica.

Ecuación de Nernst Relación que describe el efecto de la concentración de electrolito sobre el potencial del electrodo en una celda electroquímica.

Electrolito Medio conductor a través del cual se mueven iones para transportar corriente en una celda electroquímica.

Escasez de oxígeno En la celda de concentración, las regiones del electrolito con bajo oxígeno causan que el material base se comporte como ánodo y sufra corrosión.

Estabilización Adición de titanio o de niobio a un acero inoxidable para evitar la corrosión intergranular.

Inhibidores Aditivos para el electrolito que emigran de preferencia ya sea hacia el ánodo o al cátodo, causando polarización y reduciendo la rapidez de corrosión.

Oxidación Reacción de un metal con el oxígeno para producir un óxido metálico. Ocurre normalmente con más rapidez a temperaturas elevadas.

Pasivación Producción de un recubrimiento protector sobre la superficie del ánodo, que interrumpe el circuito eléctrico.

Polarización Modificación del voltaje entre el ánodo y el cátodo con el objeto de reducir la rapidez de corrosión. La polarización de *activación* se relaciona con la energía necesaria para causar la reacción anódica o catódica; la polarización de *concentración* se relaciona con los cambios en la composición del electrolito; la polarización de *resistencia* se relaciona con la resistividad eléctrica del electrolito.

Potencial de electrodo Se relaciona con la tendencia de un material a corroerse. El potencial es el voltaje generado entre el material y un electrodo estándar.

Reacción de oxidación Reacción anódica mediante la cual se ceden electrones a la celda electroquímica.

Reacción de reducción Reacción catódica mediante la cual se aceptan los electrones provenientes de la celda electroquímica.

Recocido y templado Tratamiento térmico utilizado para disolver los carburos y evitar la corrosión intergranular en aceros inoxidables.

Relación Pilling-Bedworth Describe la morfología de la película de óxido que se forma en una superficie metálica durante la oxidación.

Sensibilización Precipitación de carburos de cromo en los límites de grano de aceros inoxidables, para que el acero sea sensible a la corrosión intergranular.

Serie de fuerza electromotriz [fem] Grupo de elementos de acuerdo con su potencial de electrodo o, lo que es lo mismo, a su tendencia a corroerse.

Serie galvánica Grupo de aleaciones de acuerdo con su tendencia a corroerse en un ambiente en particular.

Tubérculo Acumulaciones de organismos microbianos y subproductos de la corrosión sobre la superficie de un material.

Voltaje aplicado Técnica de protección catódica mediante la cual se introduce una corriente directa en el metal que se ha de proteger, evitando así la reacción anódica.

Problemas

Sección 23-1 Corrosión química

Sección 23-2 Corrosión electroquímica

Sección 23-3 Potencial del electrodo en celdas electroquímicas

Sección 23-4 La corriente de corrosión y la polarización

Sección 23-5 Tipos de corrosión electroquímica

23-1 Explique cómo es posible formar una celda electroquímica simple usando un limón, una moneda de a centavo y un clavo de acero galvanizado.

23-2 La plata se puede pulir si se coloca en una charola de aluminio que contenga una solución de bicarbonato de sodio, sal y agua. Especule sobre cómo funciona el proceso de pulido.

- 23-3** Una tubería de hierro fundido gris se utiliza en el sistema de distribución de gas natural de una ciudad. La tubería falla y se presenta una fuga, aun cuando la inspección visual no muestra corrosión visible alguna. Dé una explicación de la falla de esta tubería.
- 23-4** Una conexión de latón para plomería fabricado con una aleación de Cu-30% Zn opera en el sistema de agua caliente de un gran edificio de oficinas. Después de cierto tiempo de uso, se presentan grietas y fugas en la conexión. Con base en el examen visual, el metal no parece haberse corroído. Dé una explicación de la falla de la conexión.
- 23-5** Trace la gráfica de la electronegatividad de los elementos citados en la tabla 23-1 como función del potencial de electrodo. (Consulte en el capítulo 2 los valores de electronegatividad.) ¿Cuál es la tendencia que se observa en esta información? Usando un ejemplo, explique la forma en que la estructura electrónica de un metal es consistente con su tendencia anódica o catódica.
- 23-6** Suponga que 10 gramos de Sn^{2+} se disuelven en 1000 ml de agua para producir un electrodo. Calcule el potencial de electrodo de la semicelda de estaño.
- 23-7** Una semicelda producida al disolver cobre en agua produce un potencial de electrodo de +0.32 V. Calcule la cantidad de cobre que debe haberse añadido a 1000 ml de agua para producir este potencial.
- 23-8** En una semicelda de platino, un potencial de electrodo es de 1.10 V. Determine la concentraciones de iones Pt^{4+} en el electrolito.
- 23-9** A un cátodo de 150 cm^2 se le aplica una densidad de corriente de 0.05 A/cm^2 . ¿Cuál es el tiempo necesario para depositar una película de plata de 1 mm de espesor en el cátodo?
- 23-10** Por electrochapado, se desea producir 100 g de platino por hora sobre un cátodo de 1000 cm^2 . ¿Cuál es la densidad de corriente del chapado requerida? Determine la corriente necesaria.
- 23-11** Una placa de 1 m^2 de acero se recubre por ambas caras con una capa de zinc de 0.005 cm de espesor. Se le aplica una densidad de corriente de 0.02 A/cm^2 en una solución acuosa. Suponiendo que el zinc se corroe de manera uniforme, determine el tiempo necesario antes de exponer el acero.
- 23-12** Una tubería de distribución de cobre, de 2 pulg de diámetro interior y 12 pies de longitud, se

conecta en forma accidental al sistema de alimentación de energía de una planta manufacturera, haciendo que circulen 0.05 A por esa tubería. Si la pared de la tubería es de 0.125 pulg, estime el tiempo necesario antes de que la tubería presente fuga suponiendo una rapidez uniforme de corrosión.

- 23-13** Una superficie de acero de 10 × 100 cm está recubierta con una capa de cromo de 0.002 cm de grueso. Después de un año de exposición a una celda electrolítica, la capa de cromo ha desaparecido por completo. Calcule la densidad de corriente necesaria para llevar a cabo esta eliminación.
- 23-14** Una celda de corrosión está formada por una hoja de cobre de 300 cm^2 y una lámina de hierro de 20 cm^2 , con una densidad de corriente de 0.6 A/cm^2 aplicada al cobre. ¿Cuál de los dos materiales es el ánodo? ¿Cuál es la rapidez de pérdida de metal del ánodo por hora?
- 23-15** Una celda de corrosión está formada por una hoja de cobre de 20 cm^2 y una lámina de hierro de 400 cm^2 , con una densidad de corriente de 0.7 A/cm^2 aplicada al cobre. ¿Cuál de los dos materiales es el ánodo? ¿Cuál es la rapidez de pérdida de metal del ánodo por hora?
- 23-16** Dé al menos dos razones de por qué el acero solo en agua, sin ningún otro metal presente, se corroe.

Sección 23-6 Protección contra corrosión electroquímica

Sección 23-7 Degradación microbiana y polímeros biodegradables

- 23-17** Explique por qué el titanio es un material que con frecuencia se usa en implantes médicos, aun cuando es uno de los materiales más anódicos citados en la tabla 23-1.
- 23-18** El Alclad es un compuesto laminar formado de dos hojas de aluminio comercialmente puro (aleación 1100) emparedadas en un núcleo de aleación de aluminio 2024. Analice la resistencia a la corrosión de este material compuesto. Suponga que una parte de una de las hojas de aluminio 1100 se eliminara mecánicamente, exponiendo una pequeña parte de la aleación 2024. ¿De qué manera afectaría esto la resistencia a la corrosión? Explique. ¿Existiría alguna diferencia en el comportamiento si el núcleo estuviera fabricado de aluminio 3003? Explique.

23-19 Los resortes de hojas de un automóvil están hechos de acero al alto carbono. Para mejor resistencia a la corrosión, ¿los muelles deben fabricarse en caliente o en frío? Explique. ¿Seguiría presente la corrosión incluso si se utiliza el proceso de fabricación deseable? Explique.

23-20 Se utilizan varios tipos de recubrimientos metálicos para la protección del acero, incluyendo zinc, plomo, estaño, cadmio, aluminio y níquel. ¿En cuáles de estos casos el recubrimiento proporcionará protección, a pesar de que el recubrimiento haya sido destruido localmente? Explique.

23-21 Un acero inoxidable austenítico se corroe en toda la zona afectada por el calor (ZAC) que rodea la zona de fusión de una soldadura. Explique la razón por la cual se presenta corrosión y analice el tipo de proceso o procedimiento de soldadura que probablemente se haya utilizado. ¿Qué sería conveniente hacer para impedir la corrosión de esa parte?

23-22 En un ambiente industrial, una tuerca de acero está firmemente apretada a un perno. Después de varios meses, se encuentra que la tuerca tiene numerosas grietas, aun cuando sobre dicha tuerca no actúa alguna carga externa aplicada. Explique por qué pudiera haber ocurrido la falla.

23-23 La flecha de la hélice de un barco está cuidadosamente diseñada para que los esfuerzos aplicados queden muy por debajo del límite de resistencia a la fatiga del material. A pesar de lo anterior, después de varios meses, la hélice se agrieta y falla. Dé una explicación por la que pudiera haber ocurrido la falla en estas condiciones.

23-24 El ala de un avión está compuesta de epoxi reforzado con fibras de carbono y está conectada a una pieza del fuselaje forjada de titanio. ¿Cuál será el ánodo para una celda de corrosión: la fibra de carbono, el titanio o el epóxico? ¿Cuál de ellos es más probable que actúe como cátodo? Explique.

23-25 La superficie interior de una tubería de hierro fundido está recubierta de brea, que proporciona un recubrimiento protector. De manera periódica, a través de esta tubería se drena la acetona de un laboratorio químico. Explique por qué, después de varias semanas, la tubería empieza a corroerse.

23-26 Un tubo de cobre trabajado en frío se suelda a un conector de acero, utilizando una alea-

ción de plomo-estaño. ¿Qué tipos de celdas electroquímicas pueden formarse debido a esta conexión? ¿Qué materiales se esperaría que sirvan de ánodo y sufran el mayor daño debido a la corrosión? Explique.

23-27 En muchas aplicaciones eléctricas se utiliza estaño puro para efectuar conexiones de soldadura con el cobre. ¿Qué metal será más probablemente el que actúe como ánodo?

23-28 En un electrolito se colocan láminas de níquel recocido, níquel trabajado en frío y níquel recristalizado. ¿Cuál es el que más probablemente se va a corroer? ¿Cuál es el menos probable? Explique.

23-29 Una tubería que transporta fertilizante líquido cruza un pequeño arroyo. La corriente de agua lleva un árbol de tamaño grande y se atasca contra la tubería de acero. Después de algún tiempo, se produce un agujero en la tubería en el punto donde el árbol toca la tubería, con el diámetro del agujero más grande en el exterior que en el interior de la tubería. Ésta empieza a dejar escapar fertilizante en el arroyo. Dé una explicación de por qué el tubo se ha corroído.

23-30 Dos láminas de acero 1040 se unen utilizando un remache de aluminio (figura 23-20). Analice las posibles celdas de corrosión que se pueden crear como resultado de este proceso de unión. Recomiende un proceso de unión que podría reducir al mínimo algunas de estas celdas.

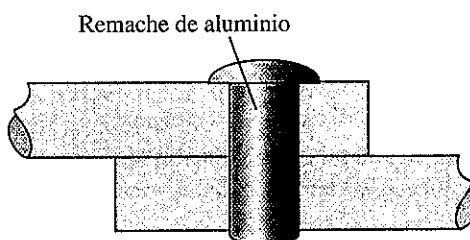


Figura 23-20 Dos hojas de acero unidas con un remache de aluminio (para el problema 23-30).

23-31 La figura 23-21 muestra la sección transversal de un circuito integrado encapsulado en epoxi, incluyendo un muy pequeño espacio entre la estructura del terminal de cobre y el polímero de epoxi. Suponga que iones de cloro del proceso de manufactura penetran

en el encapsulado. ¿Qué tipos de celdas de corrosión pueden formarse? ¿Cuáles son las partes del circuito integrado con mayores probabilidades de corroerse?

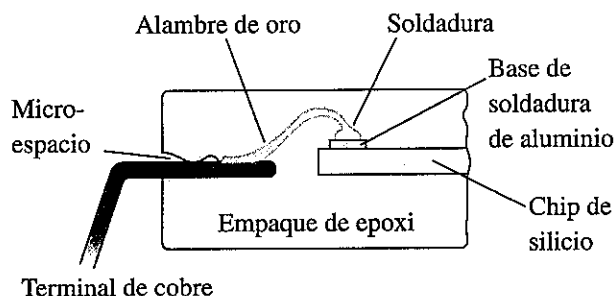


Figura 23-21 Sección transversal de un circuito integrado que muestra la terminal externa conectada al chip o microprocesador (para el problema 23-31).

23-32 Al hierro de una celda de corrosión de hierro-zinc se le aplica una densidad de corriente de 0.1 A/cm^2 . Calcule la pérdida en peso de zinc por hora

- si el zinc tiene un área de 10 cm^2 y el hierro un área de 100 cm^2 y
- si el zinc tiene una superficie de 100 cm^2 y el hierro una superficie de 10 cm^2

Sección 23-8 Oxidación y otras reacciones gaseosas

Sección 23-9 Desgaste y erosión

23-33 Determine la relación Pilling-Bedworth para los siguientes metales y anticipe el comportamiento del óxido que se forma sobre sus superficies. ¿Es protector el óxido, se desprende del metal o es permeable? (Véase en el apéndice A la densidad de los metales.)

	Densidad del óxido (g/cm^3)
Mg-MgO	3.60
Na- Na_2O	2.27
Ti- TiO_2	5.10
Fe- Fe_2O_3	5.30
Ce- Ce_2O_3	6.86
Nb- Nb_2O_5	4.47
W- WO_3	7.30

23-34 La oxidación de la mayor parte de los productos cerámicos no se considera que sea un problema. Explique.

23-35 Una lámina de cobre se expone al oxígeno a 1000°C . Después de 100 horas, 0.246 g de cobre se pierden por cm^2 del área superficial; luego de 250 horas, 0.388 g/cm^2 se pierden; y después de 500 h, 0.550 g/cm^2 se pierden. Determine si la oxidación es parabólica, lineal o logarítmica y, a continuación, determine el tiempo necesario para oxidar por completo una lámina de cobre de 0.75 cm . La lámina de cobre se oxida por ambos lados.

23-36 A 800°C , el hierro se oxida con una rapidez de 0.014 g/cm^2 por hora; a 1000°C , se oxida con una rapidez de 0.0656 g/cm^2 por hora. Suponiendo una rapidez parabólica de oxidación, determine la temperatura máxima a la que se puede mantener el hierro si la rapidez de oxidación es menor a 0.005 g/cm^2 por hora.



Problemas de diseño

23-37 Un depósito cilíndrico de acero de 3 pies de diámetro y 8 pies de largo está lleno de agua. Se encuentra que se requiere una densidad de corriente de 0.015 A/cm^2 que actúe sobre el acero para impedir la corrosión. Diseñe un sistema de ánodo de sacrificio que proteja el depósito.

23-38 Las plataformas de perforación marinas están soportadas por grandes columnas de acero que se apoyan en el fondo del mar. Diseñe un procedimiento para asegurar que no ocurrirá corrosión en las columnas de soporte de acero.

23-39 Debe construirse una bodega de almacenamiento utilizando láminas de acero para las paredes y el techo. Diseñe un sistema de protección contra la corrosión para el acero.

23-40 Diseñe los materiales para la cuchilla de nivelación de una máquina para movimiento de tierras.



Problemas de cómputo

23-41 Escriba un programa de computadora que calcule el grosor de un recubrimiento depo-

sitado utilizando diferentes entradas proporcionadas por el usuario (por ejemplo, densidad y valencia del metal, área o dimensiones de la pieza en proceso de chapado, tiempo deseado de chapado y corriente).

Knovel® Problemas

K23-1 Describa el mecanismo de corrosión por corriente parásita.

K23-2 Describa la forma en que cambia la rapidez de corrosión del cobre con una rapidez cre-

ciente de solución a diferentes temperaturas. Explique el mecanismo para este cambio.

K23-3 Cinco gramos de zirconio se disuelven en 1000 g de agua, produciendo un electrolito de iones de Zr^{4+} . Calcule el potencial de electrodo de la semicelda de cobre en este electrolito, a temperatura y presión estándares, usando la ecuación de Nernst.

Apéndice A: Propiedades físicas de metales seleccionados

Metal		Número atómico	Estructura cristalina	Parámetros de red (Å)	Masa atómica g/mol	Densidad (g/cm³)	Temperatura de fusión (°C)
Aluminio	Al	13	CCCa	4.04958	26.981	2.699	660.4
Antimonio	Sb	51	hex	$a = 4.307$ $c = 11.273$	121.75	6.697	630.7
Arsénico	As	33	hex	$a = 3.760$ $c = 10.548$	74.9216	5.778	816
Bario	Ba	56	CCCu	5.025	137.3	3.5	729
Berilio	Be	4	CH	$a = 2.2858$ $c = 3.5842$	9.01	1.848	1290
Bismuto	Bi	83	mono	$a = 6.674$ $b = 6.117$ $c = 3.304$ $\beta = 110.3^\circ$	208.98	9.808	271.4
Boro	B	5	rombo	$a = 10.12$ $\alpha = 65.5^\circ$	10.81	2.36	2076
Cadmio	Cd	48	CH	$a = 2.9793$ $c = 5.6181$	112.4	8.642	321.1
Calcio	Ca	20	CCCa	5.588	40.08	1.55	839
Cerio	Ce	58	CH	$a = 3.681$ $c = 5.99$	140.12	6.6893	798
Cesio	Cs	55	CCCu	6.13	132.91	1.892	28.6
Cobalto	Co	27	CH	$a = 2.5071$ $c = 4.0686$	58.93	8.832	1495
Cobre	Cu	29	CCCa	3.6151	63.54	8.93	1084.9
Cromo	Cr	24	CCCu	2.8844	51.996	7.19	1907
Estaño	Sn	50	tetra	$a = 5.832$ $c = 3.182$	118.69	5.765	231.9
			CD	6.4912			
Estroncio	Sr	38	CCCa	6.0849	87.62	2.6	777
			CCCu	4.84			(>557 °C)
Gadolinio	Gd	64	CH	$a = 3.6336$ $c = 5.7810$	157.25	7.901	1313
Galio	Ga	31	orto	$a = 4.5258$ $b = 4.5186$ $c = 7.6570$	69.72	5.904	29.8
Germanio	Ge	32	CD	5.6575	72.59	5.324	937.4

Metal		Número atómico	Estructura cristalina	Parámetros de red (Å)	Masa atómica g/mol	Densidad (g/cm³)	Temperatura de fusión (°C)
Hafnio	Hf	72	CH	$a = 3.1883$ $c = 5.0422$	178.49	13.31	2 227
Hierro	Fe	26	CCCu CCCa CCCu	2.866 3.589	55.847 (>912 °C) (>1394 °C)	7.87	1 538
Indio	In	49	tetra	$a = 3.2517$ $c = 4.9459$	114.82	7.286	156.6
Iridio	Ir	77	CCCa	3.84	192.9	22.65	2 447
Itrio	Y	39	CH	$a = 3.648$ $c = 5.732$	88.91	4.469	1 522
Lantano	La	57	CH	$a = 3.774$ $c = 12.17$	138.91	6.146	918
Litio	Li	3	CCCu	3.5089	6.94	0.534	180.7
Magnesio	Mg	12	CH	$a = 3.2087$ $c = 5.209$	24.312	1.738	650
Manganeso	Mn	25	cúbica	8.931	54.938	7.47	1 244
Mercurio	Hg	80	rombo		200.59	13.546	-38.9
Molibdeno	Mo	42	CCCu	3.1468	95.94	10.22	2 623
Níquel	Ni	28	CCCa	3.5167	58.71	8.902	1 453
Niobio	Nb	41	CCCu	3.294	92.91	8.57	2 468
Oro	Au	79	CCCa	4.0786	196.97	19.302	1 064.4
Osmio	Os	76	CH	$a = 2.7341$ $c = 4.3197$	190.2	22.57	3 033
Paladio	Pd	46	CCCa	3.8902	106.4	12.02	1 552
Plata	Ag	47	CCCa	4.0862	107.868	10.49	961.9
Platino	Pt	78	CCCa	3.9231	195.09	21.45	1 769
Plomo	Pb	82	CCCa	4.9489	207.19	11.36	327.4
Potasio	K	19	CCCu	5.344	39.09	0.855	63.2
Renio	Re	75	CH	$a = 2.760$ $c = 4.458$	186.21	21.04	3 186
Rodio	Rh	45	CCCa	3.796	102.99	12.41	1 963
Rubidio	Rb	37	CCCu	5.7	85.467	1.532	38.9
Rutenio	Ru	44	CH	$a = 2.6987$ $c = 4.2728$	101.07	12.37	2 334
Selenio	Se	34	mono	$a = 9.054$ $b = 9.083$ $c = 11.60$ $\beta = 90.8^\circ$	78.96	4.809	217
Silicio	Si	14	CD	5.4307	28.08	2.33	1 410
Sodio	Na	11	CCCu	4.2906	22.99	0.967	97.8
Tantalio	Ta	73	CCCu	3.3026	180.95	16.6	2 996
Tecnecio	Tc	43	CH	$a = 2.735$ $c = 4.388$	98.9062	11.5	2 157
Telurio	Te	52	hex	$a = 4.4565$ $c = 5.9268$	127.6	6.24	449.5
Titanio	Ti	22	CH	$a = 2.9503$ $c = 4.6831$	47.9	4.507	1 668
			CCCu	3.32			(>882 °C)

(continúa)

Metal		Número atómico	Estructura cristalina	Parámetros de red (Å)	Masa atómica g/mol	Densidad (g/cm ³)	Temperatura de fusión (°C)
Torio	Th	90	CCCa	5.086	232	11.72	1 775
Tungsteno	W	74	CCCu	3.1652	183.85	19.254	3 422
Uranio	U	92	orto	$a = 2.854$ $b = 5.869$ $c = 4.955$	238.03	19.05	1 133
Vanadio	V	23	CCCu	3.0278	50.941	6.1	1 910
Zinc	Zn	30	CH	$a = 2.6648$ $c = 4.9470$	65.38	7.133	420
Zirconio	Zr	40	CH	$a = 3.2312$ $c = 5.1477$	91.22	6.505	1 852
			CCCu	3.6090			(>862 °C)

Apéndice B: Radios atómicos e iónicos de elementos seleccionados

Elemento	Radio atómico (Å)	Valencia	Radio iónico (Å)
Aluminio	1.432	+3	0.51
Antimonio	1.45	+5	0.62
Arsénico	1.15	+5	2.22
Azufre	1.06	-2	1.84
Bario	2.176	+2	1.34
Berilio	1.143	+2	0.35
Bismuto	1.60	+5	0.74
Boro	0.46	+3	0.23
Bromo	1.19	-1	1.96
Cadmio	1.49	+2	0.97
Calcio	1.976	+2	0.99
Carbono	0.77	+4	0.16
Cerio	1.84	+3	1.034
Cesio	2.65	+1	1.67
Cloro	0.905	-1	1.81
Cobalto	1.253	+2	0.72
Cobre	1.278	+1	0.96
Cromo	1.249	+3	0.63
Estaño	1.405	+4	0.71
Estroncio	2.151	+2	1.12
Fósforo	1.10	+5	0.35
Flúor	0.6	-1	1.33
Galio	1.218	+3	0.62
Germanio	1.225	+4	0.53
Hafnio	1.55	+4	0.78
Hidrógeno	0.46	+1	1.54
Hierro	1.241 (CCCu)	+2	0.74
	1.269 (CCCa)	+3	0.64
Indio	1.570	+3	0.81
Itrio	1.824	+3	0.89
Lantano	1.887	+3	1.15
Litio	1.519	+1	0.68
Magnesio	1.604	+2	0.66
Manganeso	1.12	+2	0.80
		+3	0.66
Mercurio	1.55	+2	1.10
Molibdeno	1.363	+4	0.70

(continúa)

Elemento	Radio atómico (Å)	Valencia	Radio iónico (Å)
Niobio	1.426	+4	0.74
Níquel	1.243	+2	0.69
Nitrógeno	0.71	+5	0.15
Oro	1.442	+1	1.37
Oxígeno	0.60	-2	1.32
Paladio	1.375	+4	0.65
Plata	1.445	+1	1.26
Platino	1.387	+2	0.80
Plomo	1.75	+4	0.84
Potasio	2.314	+1	1.33
Rubidio	2.468	+1	1.48
Selenio	1.15	-2	1.91
Silicio	1.176	+4	0.42
Sodio	1.858	+1	0.97
Tántalo	1.43	+5	0.68
Telurio	1.40	-2	2.11
Titanio	1.475	+4	0.68
Torio	1.798	+4	1.02
Tungsteno	1.371	+4	0.70
Uranio	1.38	+4	0.97
Vanadio	1.311	+3	0.74
Yodo	1.35	-1	2.20
Zinc	1.332	+2	0.74
Zirconio	1.616	+4	0.79

Nótese que $1 \text{ Å} = 10^{-8} \text{ cm} = 0.1 \text{ nanómetro (nm)}$.

Respuestas a problemas seleccionados

CAPÍTULO 2

- 2-6** i) 3.30×10^{22} átomos/cm³. ii) 4.63×10^{22} átomos/cm³
2-7 a) 9.78×10^{27} átomos/ton. b) 4.7 cm³
2-8 a) 5.99×10^{23} átomos. b) 0.994 mol
2-24 MgO, el MgO tiene enlaces iónicos.
2-25 Si, el Si tiene enlaces covalentes

CAPÍTULO 3

- 3-13** a) 1.426×10^{-8} cm. b) 1.4447×10^{-8} cm.
3-15 a) 5.3349 Å. b) 2.3101 Å.
3-17 CCCa.
3-19 CCCu.
3-21 a) 8 átomos/celda. b) 0.387.
3-31 0.6% de contracción.
3-41 A: $[00\bar{1}]$. B: $[1\bar{2}0]$. C: $[\bar{1}11]$. D: $[2\bar{1}\bar{1}]$
3-43 A: $(1\bar{1}1)$. B: (030) . C: $(10\bar{2})$.
3-45 A: $[1\bar{1}0]$ o $[1\bar{1}00]$. B: $[11\bar{1}]$ o $[11\bar{2}3]$. C: $[011]$ o $[\bar{1}2\bar{1}3]$.
3-47 A: $(1\bar{1}01)$. B: (0003) . C: $(1\bar{1}00)$.
3-53 $[\bar{1}10]$, $[1\bar{1}0]$, $[101]$, $[\bar{1}0\bar{1}]$, $[011]$, $[0\bar{1}\bar{1}]$.
3-55 Tetragonal-4; ortorrómbico-2; cúbico-12.
3-57 a) (111). b) (210). c) $(0\bar{1}2)$. d) (218).
3-59 $[100]$: 0.35089 nm, 2.85 nm^{-1} , 0.866. $[110]$: 0.496 nm, 2.015 nm^{-1} , 0.612. $[111]$: 0.3039 nm, 3.291 nm^{-1} , 1. El $[111]$ tiene un empaquetamiento cerrado.
3-61 (100): $1.617 \times 10^{15}/\text{cm}^2$, fracción de empaquetamiento 0.7854. (110): $1.144 \times 10^{15}/\text{cm}^2$, fracción de empaquetamiento 0.555. (111): $1.867 \times 10^{15}/\text{cm}^2$, 0.907. El (111) tiene un empaquetamiento cerrado.
3-63 4 563 000.
3-66 a) 0.2978 Å. b) 0.6290 Å.
3-69 a) 6. c) 8. e) 4. h) 6.
3-72 Fluorita. a) 5.2885 Å. b) 12.13 g/cm³. c) 0.624.
3-74 Cloruro de cesio. a) 4.1916 Å. b) 4.8 g/cm³. c) 0.693.
3-76 (111): $1.473 \times 10^{15}/\text{cm}^2$, 0.202 (Mg⁺²). (222): $1.473 \times 10^{15}/\text{cm}^2$, 0.806 (O⁻²).
3-81 0.40497 nm.
3-83 a) CCCu. c) 0.2327 nm.

CAPÍTULO 4

- 4-2** 4.98×10^{19} vacancias/cm³.
4-4 a) 0.00204. b) 1.39×10^{20} vacancias/cm³.
4-6 a) 1.157×10^{20} vacancias/cm³. b) 0.532 g/cm³.

894 Respuestas a problemas seleccionados

- 4-9** 0.344.
4-11 8.262 g/cm^3 .
4-13 a) 0.0449. b) un átomo de H por 22.3 celdas unitarias.
4-15 a) 0.0522 defectos por celda unitaria. b) 2.47×10^{20} defectos/cm³.
4-19 a) $[0\bar{1}1]$, $[01\bar{1}]$, $[\bar{1}10]$, $[1\bar{1}0]$, $[\bar{1}01]$, $[10\bar{1}]$.
 b) $[1\bar{1}\bar{1}]$, $[\bar{1}1\bar{1}]$, $[\bar{1}\bar{1}1]$, $[11\bar{1}]$.
4-21 $(1\bar{1}0)$, $(\bar{1}10)$, $(0\bar{1}1)$, $(01\bar{1})$, $(10\bar{1})$, $(\bar{1}01)$.
4-23 $(111)[\bar{1}\bar{1}0]$; $b = 2.863 \text{ Å}$, $d = 2.338 \text{ Å}$. $(110)[1\bar{1}1]$;
 $b = 7.014 \text{ Å}$, $d = 2.863 \text{ Å}$. Razón = 0.44.
4-42 a) $K = 19.4 \text{ psi } \sqrt{\text{m}}$, $\sigma_0 = 60\,290 \text{ psi}$. b) 103 670 psi.
4-44 a) 128 granos/pulg². b) 1 280 000 granos/pulg².
4-46 3.6.
4-52 284 Å .

CAPÍTULO 5

- 5-9** 1.08×10^9 saltos/s.
5-16 $D_H = 1.07 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ contra $D_N = 3.9 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$. Los átomos de H más pequeños se difunden más rápidamente.
5-18 a) 59 390 cal/mol. b) $0.057 \text{ cm}^2/\text{s}$.
5-24 a) $-0.02495 \text{ at\% Sb/cm}$. b) $-1.246 \times 10^{19} \text{ Sb}/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm})$.
5-26 a) -1.969×10^{11} átomos de H / $(\text{cm}^3 \cdot \text{cm})$.
 b) 3.3×10^7 átomos de H / $(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$.
5-28 $1.25 \times 10^{-3} \text{ g/h}$.
5-30 -198 °C .
5-42 $D_0 = 3.47 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{s}$ contra $D_{Al} = 2.48 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s}$. Es más fácil que los iones Al se difundan.
5-43 0.01 cm: 0.87% C. 0.05 cm: 0.43% C. 0.10 cm: 0.16% C.
5-45 907 °C .
5-47 0.53% C.
5-49 190 s.
5-51 1184 s.
5-53 667 °C .
5-61 50 488 cal/mol; sí.

CAPÍTULO 6

- 6-21** a) Se deforma. b) No se forma rebajo.
6-22 b) 1 100 lb o 4891 N.
6-24 20 000 lb.
6-26 50.0543 ft.
6-32 a) 11 600 psi. b) 13 210 psi. c) 603 000 psi. d) 4.5%. e) 3.5%. f) 11 300 psi. g) 11 706 psi. h) 76.4 psi.
6-34 a) 274 MPa. b) 417 MPa. c) 172 GPa. d) 18.55%. e) 15.8%. f) 397.9 MPa. g) 473 MPa. h) 0.17 MPa.

- 6-35** a) $l_f = 12.00298$ pulg., $d_f = 0.39997$ pulg.
6-40 a) 76 800 psi. b) 22.14×10^6 psi.
6-42 a) 41 mm; no se fracturará.
6-50 29.8 kg/mm².
6-61 No es sensible a muescas; tenacidad deficiente.

CAPÍTULO 7

- 7-4** 0.99 MPa $\sqrt{\text{m}}$.
7-5 No; la prueba no será lo suficientemente sensible.
7-22 15.35 lb.
7-24 $d = 1.634$ pulg.
7-26 22 MPa; máx = +22 MPa, mín = -22 MPa, medio = 0 MPa; una frecuencia más alta reducirá la resistencia a la fatiga debida al calentamiento.
7-28 a) 2.5 mm. b) 0.0039 mm.
7-32 $C = 2.061 \times 10^{-3}$; $n = 3.01$.
7-43 101 329 h.
7-45 $n = 6.82$. $m = -5.7$.
7-47 29 días.
7-49 0.52 pulg.
7-51 2 000 lb.

CAPÍTULO 8

- 8-5** a) 1 — la pendiente es más aguda. b) 1 — es más fuerte. c) 2 — es más dúctil y menos fuerte.
8-7 $n = 0.12$; CCCu.
8-11 $n = 0.15$.
8-12 0.56.
8-22 0.152 pulg.
8-24 25 000 psi de tensión, 21 000 psi de fluencia, 6% elongación.
8-26 Primer paso: 36% de TF que dan 25 000 psi de tensión, 21 000 psi de fluencia, 6% de elongación. Segundo paso: 64% de TF que dan 28 000 psi de tensión, 25 000 psi de fluencia, 4% de elongación. Tercer paso: 84% de TF que dan 30 000 psi de tensión, 28 000 psi de fluencia, 3% de elongación.
8-28 0.76 a 0.96 pulg.
8-30 48% de TF, 26 000 psi de tensión, 23 000 psi de fluencia, 4% de elongación.
8-45 a) 1 414 lb. b) no se romperá.
8-58 a) 550 °C, 750 °C, 950 °C. b) 700 °C. c) 900 °C. d) 2285 °C.
8-68 Pendiente = 0.4. Sí.

CAPÍTULO 9

- 9-11** a) 6.65 Å. b) 109 átomos.
9-13 1.136×10^6 átomos.
9-30 a) 0.0333. b) 0.333. c) Todos.
9-31 1265 °C.
9-35 31.15 s.

- 9-37** $B = 300 \text{ s/cm}^2$, $n = 1.6$.
9-40 a) $\sim 4.16 \times 10^{-3} \text{ cm}$. b) 90 s.
9-42 $c = 0.003 \text{ s}$, $m = 0.35$.
9-44 0.03 s.
9-50 a) 900 °C. b) 430 °C. c) 470 °C. d) $\sim 250 \text{ °C/min}$. e) 9.7 min.
 f) 8.1 min. g) 60 °C. h) zinc. (i) 87.3 min/pulg².
9-60 V/A (mazarota) = 0.68, V/A (grueso) = 1.13, V/A (delgado) = 0.89; no efectivo.
9-62 $D_{\text{Cu}} = 1.48 \text{ pulg}$. $D_{\text{Fe}} = 1.30 \text{ pulg}$.
9-64 a) 46 cm³. b) 4.1%.
9-69 23.04 cm.
9-72 0.046 cm³/100 g Al.

CAPÍTULO 10

- 10-23** a) Sí. c) No. e) No. g) No.
10-26 El Cd debe dar la menor reducción en conductividad; ninguno debe dar solubilidad sólida ilimitada.
10-33 a) 2 330 °C, 2 150 °C, 180 °C. c) 2 570 °C, 2 380 °C, 190 °C.
10-35 a) 100% de L con 30% de MgO. b) 70.8% de L con 38% de MgO, 29.2% de S con 62% de MgO. c) 8.3% de L con 38% de MgO, 91.7% de S con 62% de MgO. d) 100% de S con 85% MgO.
10-38 a) L: 15 de %mol de MgO u 8.69 de %pe de MgO. S: 38 de %mol de MgO o 24.85 %pe de MgO. b) L: 78.26 de %mol u 80.1 %pe; S: 21.74 de %mol o 19.9 %pe de MgO. c) 78.1 de %vol de L, 21.9 de %vol de S.
10-40 750 g Ni, Ni/Cu = 1.62.
10-42 331 g MgO.
10-44 64.1 de %pe de FeO.
10-46 a) 49% en peso W en L, 70% en peso W en α . b) No es posible.
10-48 212 lb W; 1 200 lb W.
10-50 No se disuelve; cuando el líquido alcanza 10% en peso de Ni, el baño empieza a solidificarse.
10-54 a) 2 900 °C, 2 690 °C, 210 °C. b) 60% de L con 49% de W, 40% α con 70% de W.
10-56 a) 55% W. b) 18% W.
10-60 a) 2 900 °C. b) 2 710 °C. c) 190 °C. d) 2 990 °C. e) 90 °C. f) 300 s. g) 340 s. h) 60% W.
10-63 a) 2 000 °C. b) 1 450 °C. c) 550 °C. d) 40% FeO. e) 92% FeO.
 f) 65.5% de L con 75% de FeO, 34.5% de S con 46% de FeO.
 g) 30.3% de L con 88% de FeO, 69.7% de S con 55% de FeO.
10-64 a) 3 100 °C. b) 2 720 °C. c) 380 °C. d) 90% W. e) 40% W.
 f) 44.4% de L con 70% de W, 55.6% de α con 88% de W.
 g) 9.1% de L con 50% de W, 90.9% de α con 83% de W.

CAPÍTULO 11

- 11-7** a) θ , no estequiométrica. b) $\alpha, \beta, \gamma, \eta$. B es alotrópica, existe en tres formas diferentes a distintas temperaturas. c) 1100 °C: peritética. 900 °C: monotética. 690 °C: eutética. 600 °C: peritectoide. 300 °C: eutectoide.
11-10 c) SnCu₃.
11-11 SiCu₄.
11-13 a) 2.5% Mg, (b) 600 °C, 470 °C, 400 °C, 130 °C. c) 74% de α con 7% de Mg, 26% de L con 26% de Mg. d) 100% de α con 12% de Mg. e) 67% de α con 1% de Mg, 33% de β con 34% de Mg.
11-15 a) Hipereutética. b) 98% de Sn. c) 22.8% de β con 97.5% de Sn, 77.2% de L con 61.9% de Sn. d) 35% de α con 19% de Sn, 65% β con 97.5% de Sn. e) 22.8% de β primaria con 97.5% de Sn, 77.2% eutética con 61.9% de Sn. f) 30% de α con 2% de Sn, 70% de β con 100% de Sn.

- 11-19** a) Hipoeutéctica. b) 1% de Si. c) 78.5% de α con 1.65% de Si, 21.5% de L con 12.6% de Si. d) 97.6% de α con 1.65% de Si, 2.4% de β con 99.83% de Si. e) 78.5% de α primaria con 1.65% de Si, 21.5% eutéctica con 12.6% de Si. e) 21.5% eutéctica con 12.6% de Si. f) 96% de α con 0% de Si, 4% de β con 100% de Si.
- 11-21** 56% de Sn, hipoeutéctica.
- 11-23** 52% de Sn.
- 11-25** 17.5% de Li, hipereutéctica.
- 11-27** 60.5% de α , 39.5% de β ; 27.7 de α primaria, 72.3% eutéctica; 0.54.
- 11-29** a) 1150 °C. b) 150 °C. c) 1000 °C. d) 577 °C. e) 423 °C.
f) 10.5 min. g) 11.5 min. h) 45% Si.

CAPÍTULO 12

- 12-3** $c = 8.9 \times 10^{-6}$, $n = 2.81$.
- 12-24** a) Para Al – 4% Mg: trate con solución entre 210 y 451 °C, temple y envejezca debajo de 210 °C. Para Al – 6% Mg: trate con solución entre 280 y 451 °C, temple y envejezca debajo de 280 °C. Para Al–12% Mg: trate con solución entre 390 y 451 °C, temple y envejezca debajo de 390 °C. c) Los precipitados no son coherentes.
- 12-36** a) Tratar por solución entre 290 y 400 °C, templar y envejecer debajo de 290 °C. c) No es un buen candidato. e) No es un buen candidato.
- 12-49** a) 795 °C, b) Ferrita primaria. c) 56.1% de ferrita que contiene 0.0218% de C y 43.9% de austenita que contenga 0.77% de C. d) 95.1% de ferrita que contenga 0.0218% de C y 4.9% de cementita que contenga 6.67% de C. e) 56.1% de ferrita primaria que contenga 0.0218% de C y 43.9% de perlita que contenga 0.77% de C.
- 12-51** 0.53% de C, hipoeutectoide.
- 12-53** 0.156% de C, hipoeutectoide.
- 12-55** 0.281% de C.
- 12-57** 760 °C, 0.212% C.
- 12-61** a) 900 °C; 12% de CaO en tetragonal, 3% de CaO en monoclinico, 16% de CaO en cúbico; 30.8% monoclinico, 69.2% cúbico, c) 250 °C; 47% de Zn en β' , 36% de Zn en α , 59% de Zn en γ , 52.2% de α , 47.8% de γ .
- 12-71** a) 615 °C. b) 1.67×10^{-5} cm.
- 12-73** Bainita con DRC 47.
- 12-75** Martensita con DRC 66.
- 12-84** a) 37.2% martensita con 0.77% de C y DRC 65.
c) 84.8% martensita con 0.35% de C y DRC 58.
- 12-86** a) 750 °C. b) 0.455% C.
- 12-88** ~3% de expansión.
- 12-90** Austenitizar a 750 °C, templar y revenir arriba de 330 °C.

CAPÍTULO 13

- 13-3** a) 97.8% de ferrita, 2.2% de cementita, 82.9% de ferrita primaria, 17.1% de perlita.
c) 85.8% de ferrita, 14.2% de cementita, 3.1% de cementita primaria, 96.9% de perlita.
- 13-8** Para 1035: $A_1 = 727$ °C; $A_3 = 790$ °C; recocer = 820 °C; normalizar = 845 °C; recocido de proceso = 557 – 647 °C; usualmente no es esferoidizado.
- 13-12** a) Ferrita y perlita. c) Martensita. e) Ferrita y bainita.
g) Martensita templada.
- 13-14** a) Austenitizar a 820 °C, mantener a 600 °C durante 10 s, enfriar.
c) Austenitizar a 780 °C, mantener a 600 °C durante 10 s, enfriar.
e) Austenitizar a 900 °C, mantener a 320 °C durante 5000 s, enfriar.

- 13-18** a) Austenitizar a 820 °C, templar y revenir entre 420 y 480 °C; 150 000 a 180 000 psi de tensión, 140 000 a 160 000 psi de fluencia. b) 175 000 a 180 000 psi de tensión, 130 000 a 135 000 psi de fluencia. c) 100 000 psi de tensión, 65 000 de fluencia, 20% de elongación.
- 13-20** 0.48% de C en martensita; austenitizado a 770 °C; debe austenitizarse a 860 °C.
- 13-22** 1080: perlita fina. 4340: martensita.
- 13-26** Puede hacerse hipereutectoide con cementita de límite de grano.
- 13-28** a) No es aplicable. c) 8 a 10 °C/s. e) 32 a 36 °C/s.
- 13-30** a) 16 °C/s. b) Perlita con DRC 38.
- 13-32** a) Perlita con DRC 36. c) Perlita y martensita con DRC 46.
- 13-34** a) 1.3 pulg. c) 1.9 pulg. e) Mayor a 2.5 pulg.
- 13-37** 0.30 h.
- 13-41** 0.05 mm: perlita y martensita con DRC 53. 0.15 mm: perlita mediana con DRC 38.
- 13-44** Ferrita δ ; solidificación sin equilibrio; recocer.
- 13-49** 2.4% Si.

CAPÍTULO 14

- 14-9** 27% de β contra 2.2% de β .
- 14-13** a) 0.113 pulg., 0.0151 lb, \$0.023. b) 0.113 pulg., 0.0233 lb, \$0.014.
- 14-17** Al: 340%. Mg: 31%. Cu: 1004%.
- 14-19** El plomo puede fundirse durante trabajo en caliente.
- 14-21** γ' porque es más pequeña y más numerosa que el carburo.
- 14-24** Ti-15% V: 100% de β se transforma en 100% de α' , que entonces se transforma en precipitado de 24% de β en una matriz α . Ti-35% de V: 100% de β se transforma en 100% de β_{ss} , que entonces se transforma en precipitado de 27% de α en una matriz β .
- 14-25** Al: 7.5×10^5 pulg. Cu: 5.3×10^5 pulg. Ni: 3.3×10^5 pulg.
- 14-28** Se desprende; se agrieta.

CAPÍTULO 15

- 15-22** $B = 2.4$; verdadera porosidad = 22.58%; fracción = 0.557.
- 15-28** 1.276 kg BaO; 0.249 kg Li₂O.

CAPÍTULO 16

- 16-9** a) 2500. b) 2.4×10^{18} .
- 16-12** a) 211. b) 175.
- 16-16** Polibutadieno y silicona; la T_g debe ser menor a -78 °C.
- 16-18** Polietileno y polipropileno.
- 16-26** 1 246 psi.
- 16-27** 1.055×10^5 cal/mol.

CAPÍTULO 17

- 17-8** 7.8×10^{13} por cm³.
- 17-10** 2.48%.
- 17-14** 9.41 g/cm³.
- 17-17** a) 0.507. b) 0.507. c) 7.77 g/cm³.

- 17-19** 11.2 a 22.2 kg.
17-26 a) 2.56 g/cm^3 . b) $29 \times 10^6 \text{ psi}$. c) $15.2 \times 10^6 \text{ psi}$.
17-29 188 MPa.
17-31 Para $d = 20 \text{ }\mu\text{m}$, $l_c = 0.30 \text{ cm}$, $l_c/d = 150$. Para $d = 1 \text{ }\mu\text{m}$, $l_c = 0.15 \text{ cm}$, $l_c/d = 1500$.
17-39 El agarre mejora la resistencia.
17-41 Pirolizar a $2\,500\text{ }^\circ\text{C}$; 250 000 psi.
17-45 $E_{\text{paralelo}} = 10.04 \times 10^6 \text{ psi}$; $E_{\text{perpendicular}} = 2.96 \times 10^6 \text{ psi}$.
17-47 $E_{\text{paralelo}} = 11.86 \times 10^6 \text{ psi}$; $E_{\text{perpendicular}} = 10 \times 10^6 \text{ psi}$.
17-49 0.417 g/cm^3 ; 20.0 kg contra 129.6 kg.

CAPÍTULO 18

- 18-2** a) 0.26 gal. b) 0.77 g/cm^3 .
18-6 Se expande 83.9 pulg perpendicular a los tablones.
18-10 a) 640 sacos, 53.9 ton cortas de arena, 111 ton cortas de agregado, 2032 gal.
 b) $4\,000 \text{ lb/yd}^3$. c) 1 : 1.79 : 3.58.

CAPÍTULO 19

- 19-1** a) 3377 W. b) $3.183 \times 10^{14} \text{ W}$.
19-4 $d = 0.0864 \text{ cm}$; 1174 V.
19-8 0.0234 km/h ; 0.0146 millas/h .
19-13 $3.03 \times 10^5 \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ a $-50\text{ }^\circ\text{C}$; $0.34 \times 10^5 \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ a $500\text{ }^\circ\text{C}$.
19-15 $-81.8\text{ }^\circ\text{C}$.
19-18 A $400\text{ }^\circ\text{C}$, $\rho = 41.5 \times 10^{-6} \text{ ohm} \cdot \text{cm}$; $\rho_d = 8.5 \times 10^{-6} \text{ ohm} \cdot \text{cm}$; $b = 1.79 \times 10^{-4} \text{ ohm} \cdot \text{cm}$.
 A $200\text{ }^\circ\text{C}$, $\rho = 3.8 \times 10^{-5} \text{ ohm} \cdot \text{cm}$.
19-21 a) $n(\text{Ge}) = 2.51 \times 10^{13} \text{ por cm}^3$. b) $f(\text{Ge}) = 1.42 \times 10^{-10}$.
 c) $n_0(\text{Ge}) = 1.14 \times 10^{19} \text{ por cm}^3$.
19-23 Sb: $10.8 \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. In: $3.8 \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$.
19-30 2600%.
19-41 a) $4.85 \times 10^{-19} \text{ m}$. c) $1.15 \times 10^{-17} \text{ m}$.
19-43 9.4 V.
19-46 $0.001239 \text{ }\mu\text{F}$.

CAPÍTULO 20

- 20-6** Fe: 39 604 Oe. Co: 31 573 Oe.
20-14 6068 Oe.
20-16 8 000 G; 1.49 mA.
20-31 a) 13 000 G. b) 14 000 G. c) 800 Oe. d) 5.8 G/Oe. e) 15.6 G/Oe. f) $6.3 \times 10^6 \text{ G Oe}$.
20-39 $15 \times 10^6 \text{ G} \cdot \text{Oe}$.
20-40 Inductancia de saturación elevada.
20-43 $4.68 \times 10^5 \text{ A/m}$.

CAPÍTULO 21

- 21-10** Hielo, agua, teflón.
21-14 4%; 0.35%.
21-16 a) 6.56° . b) 6.65° . c) 10° . d) 0.18 cm.

- 21-18** 0.0117 cm.
21-29 1.84×10^{-5} s.
21-33 a) 13.1×10^{-5} cm. b) 77.6×10^{-5} cm.
21-35 1.85×10^{-4} cm; infrarrojo.
21-38 13 800 V.
21-40 7 480 V.
21-42 a) 24 825 V. b) Cu, Mn, Si.

CAPÍTULO 22

- 22-4** a) 1 900 cal, 7 950 J. c) 8 500 cal, 35 564 J.
22-6 0.0375 cm.
22-8 1.975 m.
22-11 15.182 m.
22-14 Latón: 10.0246 pulg., Invar: 10.0020 pulg.
22-18 256 200 psi; tensión.
22-20 No; 24 510 psi; 0.0098 pulg disminución en longitud.
22-26 a) 78.5×10^6 cal/día. b) 47.09×10^6 cal/día.
22-29 19.6 min.
22-32 Hojuelas de grafito interconectadas en hierro gris.

CAPÍTULO 23

- 23-3** Corrosión gráfica.
23-6 -0.172 V.
23-8 0.000034 g/1000 mL.
23-10 0.055 A/cm²; 55 A.
23-12 34 años.
23-14 187.5 g Fe perdidos/hora.
23-18 La aleación 1100 es ánodo y continúa para proteger la 2024; la aleación 1100 es cátodo y la 3 003 se corroerá.
23-20 Al, Zn, Cd.
23-22 Agrietamiento de corrosión por esfuerzo.
23-24 El Ti es el ánodo; el carbono es el cátodo.
23-28 El níquel trabajado en frío se corroerá más rápidamente; el níquel recocido se corroerá más lentamente.
23-32 a) 12.2 g/h. b) 1.22 g/h.
23-34 Casi todas las cerámicas ya son óxidos.
23-36 698 °C.

Índice

A

Abrasivos, 657

Absorción, materiales fotónicos, 800-801, 807-808, 813, 824

Acero

al carbono simple, 376
galvanizado, 515
terne, 515

Acero inoxidable, 351, 363, 376, 519-522, 529-531, 871-872
aleaciones resistentes a la corrosión, 376
austenítico, 521-522
corrosión, prevención de, 871-872
descarburación con oxígeno y argón (DOA) de, 351, 363
dúplex, 522, 530
endurecido por precipitación (EP), 522
ferrítico, 520
martensítico, 520
propiedades de, 519-521
tratamiento térmico, 519-522, 529-531
tratamiento térmico por templeado y recocido, 871

Aceros, 156-157, 376, 459, 468-469, 475-478, 482-483, 493-519, 529-531, 871
al níquel muy bajos en carbono, 515-531
austenitización, 498, 530
carbono simple, 376
clasificaciones, 497-498
concentración de carbono en, 501-503
corrosión, prevención de, 871
de alta resistencia y baja aleación (HSLA), 514-515
de especialidades, 514-515
de fase dual, 515, 530
de grano orientado, 515
designaciones, 494-497
diagramas de tiempo-temperatura-transformación (TTT) para, 501-503, 510
diagramas de transformación de enfriamiento continuo (TEC) para, 507-508
elementos de aleación, efectos de en, 509-511
endurecibles en horno, 459, 482
endurecimiento de superficie de, 156-157
esferoides, 499-500, 531
especiales, 514-515
estabilidad de fase, 509-510
estabilizados, 871, 883

fase doble, 515, 530
galvanizados, 515
grano orientado, 515
hipereutectoides, 468-469
hipoeutectoides, 468-469
inoxidables austeníticos, 521-522
inoxidables dúplex, 522, 530
inoxidables endurecidos por precipitación (EP), 522
inoxidables ferríticos, 520
inoxidables martensíticos, 520
martensita en, 475-478, 482
normalización, 498-499, 531
para herramienta, 514-531
proceso de recocido, 498, 531
propiedades de, 477
reacciones eutectoides, 459, 468-469, 475-478, 482-483
recocido, 498-499, 500-501, 529
sensibilizados, 871, 883
sin intersticios, 515-530
soldabilidad del, 518-519
templabilidad, 509, 511-514
templado de, 477-478, 483, 510
terne, 515
tratamientos de superficie, 516-518
tratamientos térmicos, 493-519, 529-531
tratamientos térmicos de templeado y revenido, 504-508
tratamientos térmicos isotérmicos, 500-503, 530
TRIP, 515, 531

Adhesivos

conductores, 638
de fusión en caliente, 638
para evaporación (difusión), 638
sensibles a la presión, 638

Agregados, 707, 709-710, 714

Aislantes, 722-723, 727-728, 750
conductividad de, 722-723
estructura de banda de, 727-728
propiedades de, 750

Albura, 699, 715

Aleaciones, 7-8, 18, 59-60, 346, 364-365, 376, 397-402, 404-405, 412-438, 450, 491, 538-569, 732, 787-789
alfa-beta de titanio, 558-562
alfa de titanio, 556-557
aplicaciones de, 7-8
atomización por rocío, 401-402, 405
beta de titanio, 556-558

bioactivas, 560, 564
biocompatibles, 360, 564
características matriciales, 414, 442
con memoria de forma (AMF), 479-480, 482
conductividad de, 732
configuración atómica de, 59-60
de berilio, 548
de cobalto, 552-555
de formación de corteza, 346, 365
de formación de pasta, 346, 364
de hierro y níquel, usos magnéticos de, 787
de magnesio, 547-548
de plomo y cobre, 551
de solución sólida, 420
de titanio, 556-562
de una fase, 376, 405
diagramas de fases eutécticos para, 420-435
endurecimiento (precipitación) por envejecimiento, 458-465, 482-483
endurecimiento por dispersión, 412-438, 450-491
endurecimiento por solución sólida, 376, 397-402, 404-405, 550-551
estructura de Widmanstätten, 456-457, 483
eutécticas, 423-426, 430-438
forjadas, 541, 543-544, 564
formación de corteza, 346, 365
formación de pasta, 346, 364
hipereutécticas, 426-430, 442
hipoeutécticas, 426-430, 442
límite de solubilidad, exceder, 420-423, 456-458
macrosegregación, 401, 404
magnéticas, 787-789
martensíticas en, 475, 479
materiales amorfos como, 59-60
microconstituyentes, 414, 424, 429, 442
microsegregación, 401-402, 404
multifase, 376, 404
polvos, 401-402
precipitados coherentes, 458, 482
prensado en caliente (PC), 401-404
prensado isostático en caliente (PIC), 401-402, 404
procesamiento de solidificación rápida, 59, 103, 401-402

- propiedades materiales de, 7-8, 18
reacciones eutécticas, 412-449
reacciones eutéctoides, 450-491
relaciones interfaciales de energía, 457, 482
segregación de, 401-402, 405
solidificación de, 397-399
solidificación sin equilibrio de, 399-402
solución sólida, 420
tratamiento térmico de
 homogeneización, 401, 404
- Aleaciones de níquel, 552-555
 aleaciones de cobalto y, 552-555
 endurecimiento por dispersión de carburo, 554
 endurecimiento por envejecimiento (precipitación), 554
 endurecimiento por solución sólida, 553-554
 monel, 553, 564
 propiedades y aplicaciones de, 552-553
 superalloys, 553, 555, 564
- Aleaciones no ferrosas, 538-569
 aluminio, 540-547, 564
 berilio, 548
 bioactivas, 560, 564
 biocompatibles, 360, 564
 cobalto, 552-555
 cobre, 548-552, 564
 endurecimiento por envejecimiento (precipitación), 551, 553-554
 endurecimiento por solución sólida, 550-551, 553
 facilidad de moldeo de, 544, 564
 fluidez de, 544, 564
 forjadas, 543-544
 fundición, 544-545
 magnesio, 547-548
 metales preciosos, 563-564
 metales refractarios, 562
 níquel, 552-555
 resistencia específica, 539-540, 564
 titanio, 556-562
- Almacenamiento de datos, materiales magnéticos para, 782-783
- Alótropos, 24, 44-48, 50
 buckminsterfullereno (buckybalón), 46-47
 carbono (C), 24, 44-48
 diamante, 44-45
 estructura atómica de, 24, 44-48, 50
 grafito, 45-46
 nanotubos de carbono, 47-48
- Aluminio, 157, 540-547, 564
 aleaciones, 540-547
 aleaciones forjadas, 541, 543-544, 564
 clasificación de, 541-543
 clasificación (designación) de temple, 541-543
- oxidación de, 157
 propiedades y usos de, 540-541
 vacío de aleaciones de, 544-545
- American Iron and Steel Institute (AISI)
 designaciones, 494, 496-497
- American Society for Testing and Materials (ASTM), clasificaciones, 138-139, 145, 494
- Aminas, 637
- Análisis de
 curvatura de oblea, 233-235
 figura de polo, 304, 318
 resistencia a falla, 260-265, 281
- Análisis de imagen, 138, 146
 carga, 200, 237
 efectos de la velocidad de deformación y, 200, 227-228, 237
 energía, 227, 237
 prueba, 227-230, 237
 prueba de Charpy, 227
 prueba de Izod, 207
 relaciones de diagrama de esfuerzo-deformación, 229-230
 sensibilidad a la muesca, 229, 237
 temperatura de transición de dúctil a quebradizo (TTDQ), 228-230, 236
 tenacidad, 227-228, 237
 tenacidad a la tensión, 228, 238
 tenacidad a las fracturas, 228, 237
 termoplásticos, 629
- Ángulo diedro (θ), 457, 482
- Ángulos interaxiales de celdas unitarias, 63-64
- Anión, 37, 50
- Anisotropía de forma magnética, 778, 794
- Anisotropía magnetocristalina, 787-788
- Anodizado, 871, 882
- Ánodo de sacrificio, 870, 883
- Ánodos, 854-855, 870-871, 882-883
- Antiferromagnetismo, 768, 774-775, 793
- Aramiditas, 618, 644
- Arena, uso en concreto de, 707
- Ascenso (dislocación), 276-277, 280
- Asfalto, 713
- Atomización por rocío, 401-402, 405
- Átomos del soluto, 375
- Austenita, 446-467, 470, 482, 505, 531
 control del tamaño del grano, 470
 retenida, 505, 531
 transformación eutéctico de, 466-467, 470, 482
 tratamientos térmicos de templado y revenido (aceros), 505, 531
- Austenitización, 498, 530
- Autodifusión, 161, 164, 189
- B**
- Bainita, 472-473, 482
- Banda de
 conducción, 727, 759
 valencia, 726-727, 761
- Bases, 60-61, 102
- Bigotes, 653, 669, 674, 690
- Bimetálicos, 687, 689
- Bitumen, 713, 714
- Borde (arista) de absorción, 808, 824
- Brecha de
 banda (E_g), 726-727, 740, 759
 energía (E_g), 726-727, 760
- Bronces (aleación de cobre y estaño), 551, 564
- C**
- Calandrado, 640-641
- Calibrador de deformación, 205, 238
- Calor
 específico, 336, 365, 832-834, 846
 latente de fusión (ΔH_f), 336-367, 364
- Cambium, 699-700, 714
- Campo eléctrico (E), 721, 759
- Campos de cristal, 813
- Campos magnéticos, 770-773, 77-779, 794
 ciclos de histéresis para, 778-779
 densidad de flujo (B), 770-771
 inductancia (B), 770-771
 inversión, efectos de, en dominios, 778-779
 magnetización (M), 770-773, 794
 movimiento de dominio en, 777-778
 permeabilidad (μ), 770-773, 794
 remoción, efectos de, en dominios, 778
 susceptibilidad (X_m), 772, 794
- Capacidad calorífica, 832-834, 846
- Capacitancia (C), 753-754
- Capas, 705, 715
- Carbonización, 673
- Carbono, 24, 44-48
 buckminsterfullereno, 46-47
 diamante, 44-45
 estructura atómica de, 24, 44-48
 formas alotrópicas, 24, 44-48
 grafito, 45-46
 nanotubos, 47-48
- Carburación, 156-157, 178-179, 188
 carbonitruración, 516, 530
 cianuración, 515, 530
 difusión y, 156-157, 178-179, 188
 nitruración y, 516-517, 531
 tratamientos de superficies de acero, 516-517, 530-531
 Véase también Tratamiento térmico
- Carburos cementados, 656-657, 690
- Carga (F), 200, 204-205, 235, 237
- Catión, 37, 50
- Cátodos, 854-856, 870-871, 882
- Cauchos, véase Elastómeros
- Cavitación, 880, 882

- Celda electroquímica, 854-861, 882
 ánodos, 854-855, 882
 cátodos, 854-856, 882
 electrolitos, 854, 882
 potencial de electrodo en, 857-861, 882
- Celdas
 de composición, 862-864, 882
 de concentración, 862, 865-866, 882
 de esfuerzo, 862, 864-865, 882
 solares, 811, 825
- Celdas unitarias, 60, 62-72, 73-84, 102-104
 ángulos interaxiales de, 63-64
 coordenadas de puntos, 73-74
 cúbica centrada en la cara (CCCa), 65-66, 69-70, 82-83
 densidad lineal, 76, 103
 direcciones compactas, 68, 82-83, 102
 direcciones en, 68, 73-84, 103-104
 distancia de repetición, 76, 104
 estructura compacta hexagonal (CH), 70-72, 80-83
 estructura de cristal y, 60, 62-69, 104
 factor de empaquetamiento, 69-70
 fracción de empaquetamiento, 76-77, 103
 índices de Miller, 73-75, 77-83, 103
 número coordenado, 69, 102
 número de átomos por, 65-67
 parámetros de red de, 65, 68
 planos en, 77-80, 103
 puntos en, 65-67, 73-75, 103
 radio atómico, 68, 102
 red hexagonal, 69
 unidades de repetición, 62-63
- Celulosa, 698, 714
- Cementación, 593, 596
- Cementita, 466, 482
- Cemento
 hidráulico, 705, 714
 no hidráulico, 705, 715
 Portland, 705-706, 715
- Cementos, 593-594, 596, 705-707, 714
 cerámicos, 593-594, 596
 concreto, 705-707, 714
- Centros F, 813
- Cerámica, 7-9, 18, 157, 258-260, 570-599, 841-842, 853
 aplicaciones de, 7, 9, 571-574
 cementos, 593-594, 596
 clasificación funcional de, 572-574
 compactación de, 576-578
 componentes, unión y ensamble de, 595
 conductivas, 157
 conductividad térmica de, 841-842
 conductora, 157
 corrosión química de, 853
 disolución de, 853
 esmaltes, 572, 596
 extrusión, 579
 fibras, 595
 fractura en, 258-260
 fundición en cinta, 575, 579, 597
 granos y límites de grano, 580-581
 moldeo por escurrimiento, 575, 579-580, 597
 moldeo por inyección, 579, 597
 monocristales, 595
 oxidación de, 853
 películas delgadas, 594-595
 polvos, 575-580
 porosidad, 581-582, 596
 productos de arcilla, 590-591
 propiedades de materiales de, 7-9, 18, 574
 propiedades mecánicas de, 574-575
 recubrimientos, 594
 refractarias, 591-593, 597
 sinterizado, 575, 579-580, 597
 verde, 575, 596
 vidriados, 572, 596
 vidrios inorgánicos, 359-360, 582-588
 vidrios-cerámicos, 9, 18, 588-590, 596
- Cermets, 576, 596
- Chapado, corrosión y, 859-860
- Choque térmico, 843-846
- Cianuración, 516, 530
- Ciclos de histéresis, 756, 760, 778-779, 780, 784, 794
- Ciencia e ingeniería de materiales (CIM), 2-21
 clasificación de materiales, 7-13
 clasificación funcional de materiales, 11-13
 composición de materiales, 4-6, 18
 diseño y selección de materiales, 16-17
 efectos ambientales en propiedades de materiales, 13-16
 estructura de materiales, 4-6, 13, 19
 microestructura, 4-6, 18
 procesamiento de materiales, 4-6, 19
 síntesis de materiales, 4-6, 19
 términos para, 4
 tetraedro, 2, 4-7, 18
- Cinética (rapidez) de crecimiento y formación de núcleos, 452-453
- Cintas, 667, 675, 690, 788
 fibra, 667, 675, 690
 magnética, 788
- Cobre, 548-552, 564
 aleaciones, 548-552
 aleaciones endurecibles por envejecimiento, 551
 aleaciones endurecidas de solución sólida, 550-551
 ampollado, 549, 564
 bronce (cobre-estaño) aleaciones de plomo y cobre, 551
 latón (cobre-zinc), 551, 564
 propiedades de, 548-549
 transformaciones de fase de, 551
- Coeficiente
 de absorción lineal (α), 803, 807, 825
 de expansión térmica (CET), 43, 50
 dimensional, 704
 lineal de expansión térmica (α), 834-835, 846
- Coercitividad, materiales magnéticos, 778, 793
- Colado en arena, 351-352, 365
- Colisión líquida, 880-881, 883
- Colonias, control de, 470
- Coloreado, 630, 644
- Comportamiento
 de material reopéctico, 204
 de material tixotrópico, 204
 isotrópico, 83-84, 103
 superelástico, 479, 483
- Comportamiento anisotrópico, 83-84, 102, 301-303, 316, 703
 estructura cristalina y, 83-84, 102
 madera, 703
 procesamiento de material y, 301-303, 316
- Comportamiento quebradizo, 218-221, 227-230, 236-237, 252-254, 257-258
 prueba de flexión para, 218-221, 236
 grietas, 252-254, 257-258
 módulo de flexión, 219, 237
 resistencia a la flexión (módulo de ruptura), 218-221, 237
 prueba de impacto para, 227-230, 237
- Composición de
 fases, 390-393
 materiales, 4-6, 18
 matriz, dependencia de la difusión en, 176
- Compuesto de vinilideno, 615
- Compuestos, 7-8, 10, 18, 258-260, 280, 650-695, 788. Véase también Concreto
 aplicaciones de, 7, 10, 651-653, 677-648
 avanzados, 677-679
 de matriz de cerámica, 679-682
 de matriz metálica, 679-680
 de partículas metálicas fundidas, 660
 de vinilo, 615
 delaminación, 259-260, 280
 estructuras tipo emparedado, 687-688, 690
 fibras, 665-675, 689-690
 fractura en, 258-260, 280
 imanes, 788
 intermetálicos estequiométricos, 415-416, 443, 466
 intermetálicos no estequiométricos, 416, 442
 manufactura de fibras y, 672-377
 matriz de cerámica, 679-682

- matriz metálica, 679-680
 particulados, 655-660
 propiedades materiales de, 7-8, 10, 18
 reforzados por dispersión, 651, 653-655
 regla de mezclas, 655-656, 661, 685, 690
Véase Compuestos intermetálicos
- Compuestos en partículas, 655-660
 abrasivos, 657
 carburos cementados, 656-657, 690
 contactos eléctricos, 657-658
 metal fundido, 660
 polímeros, 658-660
 regla de mezclas, 655-660, 690
- Compuestos intermetálicos, 40, 50, 414-417, 442-443, 466, 482
 cementita, 466, 482
 endurecimiento por dispersión, 414-417, 442-443, 466, 482
 enlace atómico de, 40, 50
 estequiométricos, 415-416, 443, 466
 no estequiométricos, 416, 442
 propiedades y aplicaciones de, 416-417
- Compuestos laminares, 684-687, 690
 aplicaciones de, 686-687
 bimetalicos, 687, 689
 condensadores de multicapas, 687
 enlace (unión), 685-686
 laminados, 686
 metal revestido, 686, 687, 690
 regla de mezclas, 685, 690
- Compuestos reforzados con fibra, 661-672, 677-684, 689-690
 aplicaciones de, 677-684
 avanzados, 677-679
 características de fibras, 665-675, 689-690
 devanado de filamento, 676, 690
 extrusión por estirado (pultrusión), 676-677, 690
 manufactura, 672-677
 matriz de cerámica, 679-682
 matriz de metal, 679-680
 módulo de elasticidad, 661-663
 regla de mezclas, 661, 690
 resistencia a la tensión de, 663-665
- Concepto de red y base, 60-61
- Concreto, 705-715
 agregado, 705, 707, 709-710, 714
 arena, 707
 cemento Portland, 705-706, 715
 cementos, 705-707, 714
 con aire atrapado, 709
 facilidad de trabajo, 708, 715
 mortero, 705, 714
 posesforzado, 712-713
 presforzado, 712
 propiedades de, 707-712
 reforzado, 712
 relación entre agua y cemento, 708
- Condensadores, 743, 751, 759
 de multicapas, 687
- Conductividad, 720-725, 729-732, 748-750, 839-843, 846
 aleaciones y, 732
 clasificación de material electrónico por, 722-723
 defectos a nivel atómico, efectos en, 731
 efectos de endurecimiento en, 731-732
 efectos de la temperatura en, 729-731
 efectos del procesamiento de materiales en, 731-732
 ley de Ohm, 720-725
 materiales iónicos y, 748-749
 metales y, 729-732
 óxidos y, 749
 polímeros y, 749-750
- Conductividad térmica (k), 839-843, 846
 cerámica, 841-842
 constante de Lorentz, 840, 846
 metales, 840-841
 polímeros, 842
 semiconductores, 842
- Conductores, 722-723
 de óxido de estaño e indio (ITO), 157
- Configuración (arreglo) atómica y iónica, 24-27, 51, 54-111, 112-153
 base (motivo), 55, 60-62, 102
 celdas unitarias, 60, 62-72, 73-84, 102-104
 defectos, 56, 102
 estructuras covalentes, 92-96
 estructuras cristalinas, 55, 60-92, 96-100, 102
 imperfecciones en, 112-153
 materiales amorfos, 55, 58-60, 102
 materiales iónicos, 86-92
 orden de corto alcance (OCA), 24-26, 51, 56-57, 104
 orden de largo alcance (OLA), 24-25, 51, 56-58, 103
 planos, 77-84, 103
 puntos, 60-62, 65-68, 70-75, 103
 redes, 55, 60-69, 103
 sin orden, 56
 sitios intersticiales, 84-86, 103
 técnicas de difracción para análisis de estructura cristalina, 55, 58, 96-100, 102-104
 transformaciones alotrópicas, 72-73, 102
 transformaciones polimórficas, 72-73, 103
- Constante
 de Lorentz, 840, 846
 de molde, 338-339, 364
 dieléctrica (k), 723
- Contactos eléctricos, materiales compuestos como, 657-658
- Contenido de humedad, densidad de madera y, 700-701
- Contracción, 346-349, 363-365
 cavidad, 346-347, 363
 de madera, 704
 de rechupes, 346-347, 364
 interdendrítica, 349, 364
 mazarotas para, 347-348, 365
 porosidad por, 349, 365
- Copolímeros, 382-383, 404, 617-618, 644
 formación de una solución sólida de, 382-383, 404
 estructura y propiedades de, 617-618, 644
- Corriente, corrosión y, 861-862
- Corrosión, 15, 275-276, 281, 850-887
 cantidad de, 859-867
 chapado y, 859-860
 corriente, 861-862
 de esfuerzo, 275-276, 281, 865, 883
 degradación térmica, 878-879
 desgaste y, 850-887
 efectos de materiales, 15, 275-276
 falla de, efecto en materiales, 15
 fatiga, 865
 grafitica, 853, 852
 hendidura, 866, 882
 integranular, 864, 863
 microbiana, 874
 oxidación y, 853, 855, 875-879
 polarización, 861-863
 polímeros biodegradables, 874
 por hendidura, 866, 882
 potencial de electrodo, 857-861, 882
 protección contra, 868-863
 serie de fuerzas electromotrices (fem), 857-858, 882
- Corrosión electroquímica, 854-861, 862-874, 882-883
 anodizar, 871, 882
 celdas de composición por, 862-864, 882
 celdas de concentración por, 862, 865-866, 882
 celdas de esfuerzo por, 862, 864-865, 882
 celdas electroquímicas y, 854-861, 882
 corrosión microbiana por, 867, 874
 diseño de estructuras y, 868-869
 electrochapado, 855
 inhibidores y, 870, 883
 óxido, 855-856
 potencial de electrodo y, 857-861, 882
 protección anódica (pasivación) y, 871, 883
 protección catódica, 870-871
 protección contra, 868-874
 reacción de oxidación, 855, 883
 reacciones de ánodo, 855
 reacciones de cátodo, 855-856
 recubrimientos y, 869-870
 selección y tratamiento de material, 871-874
 serie de fuerzas electromotrices (fem), 857-858, 882

- Corrosión química, 852-853, 882
 ataque por metal líquido, 852-853
 cerámica, disolución y oxidación de, 853
 corrosión gráfica, 853, 852
 deszincificado, 852, 853
 lixiviado selectivo, 853
 polímeros, 853
- Crecimiento, 336-338, 352, 357-359,
 363-365, 452-455
 anormal de granos, 186, 188
 calor específico, 336, 365
 calor latente de fusión (ΔH_f) para,
 336-338, 364
 cinética (rapidez de), 452-453
 constante de molde, 338-339, 364
 control de estructura de grano, 357-359
 cristalino laminar, 359, 364
 de cristal esferulita, 359-360, 365
 de monocristales, 357-359, 365
 de vapor-líquido-sólido (VLS), 438-440
 dendrítico, 337-338, 363
 efectos de temperatura en, 453-455
 epitaxial, 357, 359, 363
 espaciado entre brazos dendríticos
 secundarios (EBDS), 340-343, 365
 gutapercha, 631
 mecanismos para solidificación,
 336-338, 363
 monocristal, 357-359, 365
 normal de grano, 186, 189
 planar, 377, 364
 regla de Chvorinov, 338-339, 363
 solidificación direccional (SD),
 357-358, 363
 solidificación y, 338-343, 352, 363
 tiempo de solidificación, 338-343
 transformaciones de estado sólido,
 452-455
 zonas de Guinier-Preston (GP),
 461-462, 482
- Crecimiento de grano, 185-186, 188-189,
 310-313, 319
 anormal, 186, 188
 etapa de recocido, 310-313
 difusión y, 185-186, 189
 fuerza impulsora, 185-186, 189
 normal, 186, 189
 tamaño de grano recristalizado y,
 312-313, 319
- Cristales
 individuales, 595
 líquidos (CL), 58, 103
- Cristalización inducida por esfuerzo, 59,
 104, 619
- Cristalografía, 60, 102
- Curva
 de solvus, 420-422, 443
 de Wöhler (S-N), 268-272, 281
 S-N (Wöhler), 268-272, 281
- Curvas de
 enfriamiento, 343-344
 esfuerzo-ruptura, 278, 281
- D**
- Debilitamiento del hierro fundido, 528
- Defectos, 113-122, 135-147, 346-351, 731
 a nivel atómico, 56, 102, 732
 conductividad, efectos en, 731
 contracción, 346-349, 365
 de Frenkel, 114, 120, 145
 de superficie, 135-141, 147
 en superficie de material, 136
 extendidos, 115, 145
 intersticiales, 114, 117-119, 146
 límites de grano, 136-139, 145
 por sustituciones, 114, 119, 147
 propiedades materiales, efectos de en,
 141-144
 Schottky, 114, 120, 146
 solidificación en fundición, 346-351
 sustitucional, 114, 119, 147
 vacancias, 114, 115-117, 147
Véase también Grietas; Dislocaciones
- Defectos de punto (puntuales), 114-122,
 142, 145-147
 endurecimiento por solución sólida,
 efectos en, 142
 Frenkel, 114, 120, 145
 intersticiales, 114, 117-119, 146
 notación de Kroger-Vink, 120-122, 146
 reacciones químicas defectuosas,
 121-122, 145
 Schottky, 114, 120, 146
 sustitucionales, 114, 119, 147
 vacancias, 114, 115-117, 147
- Defectos superficiales, 135-143, 145-147
 límites de dominio, 141
 energías de, 141
 límites de grano, 136-139, 145
 endurecimiento por tamaño del grano,
 142-143, 146
 análisis de imagen, 138, 146
 material, 136
 endurecimiento por precipitación, 143, 146
 endurecimiento de segunda fase, 143, 146
 límites de grano de ángulo pequeño,
 139, 146
 fallas de apilamiento, 140, 147
 límites de inclinación, 139, 147
 límites de giro, 139, 147
 maclas, 140, 147
- Deformación (ϵ), 8, 199-203, 205, 208,
 216-218, 238, 452, 483
 de la austenita metaestable
 (ausformados), 510, 529
 de polímeros cristalinos, 616, 629
 elástica, 8, 200-201, 236
 energía de la, 452, 483
- propiedades mecánicas y, 199-203,
 205-208, 216-218, 238
 rapidez, 200, 227-228, 238
 rapidez de esfuerzo cortante, 202-203, 238
 valor de deformación compensado,
 208, 237
 verdadera (ϵ), 216-218, 238
- Deformación plástica, 8, 130-131, 146,
 200-201, 208-209, 238
 dislocaciones y, 130-131, 146
 fenómeno del punto de fluencia,
 208-209, 239
 propiedades mecánicas y, 200-209, 239
- Degradación térmica, 878-879
- Delaminación, 259-260, 280, 672, 690
- Densidad, 16-18, 70-71, 76, 78, 102-103,
 131, 142, 145, 700-701
 contenido de humedad en madera y,
 700-701
 de corriente (J), 721, 759
 de flujo (B), magnético, 770-771
 dislocación, 131, 142, 145
 estructuras cristalinas, 70-71, 76, 78,
 102-103, 131, 142, 145
 lineal, 76, 103
 planar, 78, 103
 selección de material y, 16, 18
 volumétrica, 581, 596
- Deposición
 electrónica, 747, 761
 física de vapor (DFV), 747, 760
 química de vapor (DQV), 594, 673,
 747-748, 759
- Descarburación con oxígeno y argón
 (DOA), 351, 363
- Desgaste, 850-887
 abrasivo, 880, 882
 adhesivo, 879-880, 882
 corrosión y, 850-887
 erosión líquida, 880-881, 883
- Designaciones de la Society of Automotive
 Engineers (SAE), 494, 496
- Deslizamiento, 124-135, 141-142, 145-146,
 255-256
 banda del, 129-130, 146
 control de, 141-142
 cruzado, 135, 145
 deformación elástica por, 131, 146
 deformación plástica por, 130-131, 146
 dirección, 124-126, 146
 esfuerzo cortante resuelto crítico (τ_{recr}),
 133-134, 145
 esfuerzo de Peierls-Nabarro, 126, 146
 estructura cristalina y, 124-135, 141-142,
 145-146
 fractura dúctil por, 255-256
 ley de Schmid, 131-133, 146
 línea, 129-130, 146
 metales, efectos en, 134-135

- número de sistemas, 134-135
plano, 124-126, 146
proceso de dislocación, 124-136
propiedades mecánicas, efectos en, 141-142
sistema, 124-125, 134-135, 146
vectores de Burgers (**b**) y, 124-128
- Desproporción, 607
- Desulfuramiento, 527, 528
- Deszincificado, 852, 853
- Devanado de filamento, 676, 690
- Devitrificación, 585, 596
- Diagrama
de fases unario, 378-379, 405
de transformación isotérmica (TI), 470-475, 482
P-T, 378-379, 405
- Diagramas de esfuerzo-deformación, 204-216, 229-230
- Diagramas de fase eutéctica, 415-417, 420-430, 442
aleaciones de solución sólida, 420
aleaciones eutécticas, 423-426, 430-438
aleaciones hipereutécticas, 427-430, 442
compuestos intermetálicos, 415-417
isopleta, 421-422, 442
límite de solubilidad, excedente de aleaciones, 420-423
microconstituyentes, 414, 424, 429, 442
- Diagramas de fases, 376-379, 387-397, 404-405, 415-440, 465-468
aplicaciones de, 389-390
binarios, 387, 404, 417-420, 465-468
composición de fases, 390-393
curva de solvus, 420-422, 443
endurecimiento por dispersión y, 415-440, 465-475
endurecimiento por solución sólida y, 376-379, 387-397, 404-405
eutécticos, 415-417, 420-430, 442
intervalo de solidificación, 388, 404
isomorfos, 387-395, 404
línea de interconexión, 391-392, 405
propiedades mecánicas y, 395-397
P-T, 378-379, 405
punto triple para condiciones de equilibrio, 378-379, 405
reacciones de tres fases, 417-420
reacciones eutéctoides, 465-468
regla de fases de Gibbs para, 376-379, 390-391, 404, 419-420
regla de la palanca para, 393-395, 404
temperatura de liquidus, 387-388, 404
temperatura de solidus, 387-388, 405
ternarios, 387
unario, 378-379, 405
zona de miscibilidad, 419, 442
- Diagramas de tiempo-temperatura-transformación (TTT), 470-475, 483, 501-503, 510
- acero, tratamiento térmico de, 501-503, 510
cambios de concentración de carbono en acero y, 501-503
reacciones eutéctoides y, 470-475, 483
transformaciones isotérmicas y, 501-503
- Diagramas de transformación de enfriamiento continuo (TEC), 507-508
- Diamagnetismo, 773, 793
- Diamante, estructura atómica del, 25, 44-45
- Dieléctricos, 722-723, 750-755
condensadores, 751, 759
conductividad de, 722-723
dependencia de la frecuencia y la temperatura, 753-754
lineales, 754-755
no lineales, 754-755
pérdidas, 751, 753-754, 759
polarización en, 751-755
propiedades de, 750, 754
resistencia, 754, 759
- Dieno, 630, 644
- Difracción
de rayos x (XRD), 58, 96-99, 104, 135
electrónica, 58, 99-100, 103
- Difusión, 155-159, 161-188
aplicaciones de, 156-159
autodifusión, 161, 164, 189
botellas de plástico para bebidas creadas por, 157
carburation, 156-157, 178-179, 188
cerámica conductiva, 157
coeficiente (*D*), 165, 168-173, 188
composición matricial, dependencia de, 176
crecimiento de grano y, 185-186, 189
distancias, 173-175, 188
dopantes (adulterantes), 157
efectos de temperatura en, 168-173
efectos del tiempo en, 173-175
endurecimiento de superficie, 156-157
energía de activación (*Q*) de, 159-161, 163-164, 188
enlace, 186-188
estructuras cristalinas, dependencia del enlace en, 175-176
flujo (*J*), 164-165, 189
fundición y, 183
gradiente de concentración, 165-168, 188
interdifusión, 161, 189
intersticial, 162-164, 189
leyes de Fick, 164-168, 177-182, 188-189
límite de grano, 173-175, 189
mecanismos para, 161-163, 189
oxidación de aluminio, 157
par, 163
polímeros y, 176-177
- procesamiento de materiales y, 182-187
recubrimientos de barrera térmicos (RBT), 157-158, 189
recubrimientos de fibra óptica para prevención de, 158
recubrimientos y película delgada para prevención de, 157
sinterización y, 183, 185, 189
superficie, 173-175, 189
vacancias, 161-164, 189
velocidad de, 164-168
volumen, 173-175, 189
- Difusividad (*D*), 165, 168-173, 188
- Diodos
emisores de luz (LED), 6, 799, 811-813, 821-822, 825
rectificadores, 741, 760
- Dipolos, magnéticos, 768-770
- Dirección, 36-37, 68, 73-84, 103-104, 124-126, 146
átomos, relación de, 36-37
celdas unitarias, 68, 73-84, 103-104
compacta, 68, 82-83, 102
comportamiento anisotrópico, 83-84, 102
comportamiento isotrópico, 83-84, 103
construcción de, en celda unitaria, 79-80
cristalográfica, importancia de, 75-76, 83-84
densidad lineal, 76, 103
deslizamiento, 124-126, 146
distancia de repetición, 76, 104
estructuras compactas hexagonales (CH), 80-82
fracción de empaquetamiento, 76-77, 103
índices de Miller, 73-75, 77-83, 103
planos {}, 77-80, 103
planos basales, 82-83, 102
planos de una forma o familia {}, 78, 103
puntos [], 73-75, 103
puntos de una forma o familia {}, 75, 103
vector Burgers (**b**) y, 124-126
- Direcciones compactas, 68, 82-83, 102
- Dislocaciones, 122-135, 141-147
análisis de curvatura de una oblea y, 233-235
de arista ($\perp$), 122-123, 145
deformación elástica y, 131, 146
deformación plástica y, 130-131, 146
densidad, 131, 142, 145
deslizamiento, 124-135, 141-142, 146
efectos del endurecimiento por esfuerzo, 142
esfuerzo cortante (τ), 124-126, 133-134, 145
esfuerzo de Peierls-Nabarro, 126, 146
esfuerzo normal (σ), 124

- estadísticamente almacenadas, 235
 geométricamente necesarias, 235
 helicoidales, 122, 146
 importancia de, 130-131
 ley de Schmid, 131-133, 146
 mezcladas, 123, 146
 microscopio electrónico de transmisión (MET) para, 129-130, 147
 movimiento, 124-130
 poros de ataque químico, 129-130, 145
 propiedades mecánicas cristalinas y, 234-235
 vectores de Burgers (b), 122-128, 145
- Dispersión,
 materiales fotónicos, 804, 824
 de Compton, 807
 de Rayleigh, 807
- Dispersoides, 653, 690
- Distancia de
 Jominy, 511-514, 530
 repetición, 76, 104
- Distribución de Weibull, 260-265, 281
- Dominios, 141, 145, 775-779, 793
 ciclos de histéresis, 778-779
 defectos en superficie límite, 141
 eliminar campo magnético, efectos de, 778
 invertir campo magnético, efectos de, 778-779
 magnéticos, 775-779, 793
 materiales ferroeléctricos y, 141, 145
 movimiento de, en campos magnéticos, 777-778
 paredes de Bloch, 776-777, 793
- Dopantes, 115, 145, 157, 720, 737-739, 759, 813
 defectos de punto y, 115, 145
 difusión y, 157
 materiales fotónicos, 813
 semiconductores, 157, 720, 737-739, 759
- Ductilidad, 35, 50, 214-215, 236, 254-257
 enlaces metálicos y, 35, 50
 porcentaje de elongación, 214, 237
 porcentaje de reducción en área, 214, 237
 prueba a la tensión, 214-215, 236
- Duramen, 699, 714
- Dureza, 221-226, 237
 macrodureza, 221, 237
 microdureza, 223, 237
 nanoindentación, 223-226, 237
 prueba de Brinell, 222-223
 prueba de Knoop (HK), 222-223
 prueba de Rockwell (DR), 222
 prueba de Vickers, 222-223
 pruebas para, 221-223
- E**
- Ecuación de
 Faraday, 859, 882
- Hall-Petch, 136-137, 146
 Nernst, 858-859, 883
- Efecto
 Bauschinger, 297, 318
 fotoeléctrico, 807-808
 Tyndal, 807
- Efectos ambientales en materiales, 13-16.
Véase también Corrosión; Fatiga; Temperatura
- Efectos del color en vidrios, 813
- Elastómeros (caucho), 200-201, 236, 603-604, 630-635, 638, 644
 composición del caucho, 638
 deformación elástica de, 200-201, 236
 enlace cruzado, 631-632, 644
 estructura molecular, 603-604
 isómeros geométricos, 630-631, 644
 propiedades de, 632-634
 termoplásticos (TPE), 604, 634-635, 645
 unidades de repetición, 632-633
 vulcanización, 631-632, 645
- Electrodos de
 agua, 856
 hidrógeno, 855
 oxígeno, 855-856
- Electrolitos, 854, 882
- Electroluminiscencia, 821-822, 825
- Electronegatividad, 31-32, 50
- Electrorrestricción, 755, 759
- Elementos, 31-34, 50-51
 electropositivos, 31, 50
 estructura atómica de, 31-32
 semiconductores, 32, 51
 tabla periódica de, 32-34, 51
 transición, 32, 51
- Elementos de aleación, 509-511
 deformación de la austenita (ausformados), 510, 529
 efectos de, en acero, 509-511
 templabilidad y, 509
 estabilidad de fase y, 509-510
 revenido y, 510-511
- Embrión, 331-332, 363
- Emisión térmica, 822-823, 825
- Endurecimiento de segunda fase, *véase* Endurecimiento por dispersión
- Endurecimiento por deformación, 142, 147, 290-314, 318-319
 características de trabajo en frío, 306-308
 dislocaciones y, 142, 147
 efecto Bauschinger, 297, 318
 esfuerzos residuales por, 304-305, 319
 fuente Frank-Read, 297-298, 318
 metales, 293-297, 318-319
 microestructuras de materiales por, 301-306
 porcentaje de trabajo en frío (%TF), 299-301
- procesamiento por deformación y, 293-294, 318
 recocido y, 308-314
 recuperación elástica, 296-297
 relaciones en curva de esfuerzo-deformación, 292-297
 termoplástico, 298-299, 319
- Endurecimiento por dispersión, 143, 146, 335, 363, 412-449, 450-491, 554, 651, 653-655
 aleaciones, 412-438, 450-491, 456-458, 464-465
 aleaciones de níquel y cobalto, 554
 carburo, 554
 compuestos, 651, 653-655
 compuestos intermetálicos, 414-417, 442-443
 diagramas de fase binaria para, 417-420, 465-468
 diagramas de fase eutéctica para, 415-417, 420-440
 dislocaciones y, 143, 146
 formación de núcleos (nucleación) y, 335, 363
 matriz, 414, 442, 651
 nanoalambres, 438-440
 precipitado (fase dispersa), 414, 441
 procesamiento de materiales y, 436-437
 reacciones de tres fases, 417-420
 reacciones eutécticas, 412-449
 reacciones eutectoides, 450-491
 solidificación sin equilibrio, 438
 soluciones sólidas, grado de y, 385, 404
- Endurecimiento por envejecimiento, 414, 441, 458-465, 482-483, 551, 553-554
 aleaciones, 458-465, 551
 aleaciones de cobre, 551
 aleaciones de níquel y cobalto, 553-554
 aplicaciones de, 459
 artificial, 463, 482
 efectos de la temperatura en, 462-463
 efectos del tiempo en, 462-463
 evolución microestructural de, 459-462
 natural, 463, 482
 precipitados sin equilibrio, 461-462
 precipitados y, 414, 441
 requisitos para, 464
 soluciones sólidas sobresaturadas, 460, 483
 temperatura de envejecimiento, 460
 templado, 459-460
 tratamiento por solución, 459, 483
 uso de alta temperatura de, 464-465
 zonas de Guinier-Preston (GP), 461-462, 48
- Endurecimiento por precipitación, 143, 146, *véase* Endurecimiento por envejecimiento

- Endurecimiento por solución sólida,
142, 376, 384-387, 397-402, 404-405,
550-551, 553
aleaciones, 376, 397-402, 405-405, 466,
483, 550-551, 553
aleaciones de cobre, 550-551
aleaciones de níquel y cobalto
efecto de, en propiedades, 386-387
efectos de defectos de punto en, 142
grado de, 385-386
proceso de solidificación rápida,
401-402, 404-405
segregación, 401-402, 405
- Endurecimiento, *véase* Endurecimiento por
dispersión; endurecimiento por
tamaño de grano; endurecimiento
por solución sólida
- Energía
de activación (Q), 159-161, 163-164, 188
de Fermi, 727, 760
de unión, 41-43, 50
interatómica (EIA), 41, 43
- Energías de defectos en superficie, 141
- Enlace atómico, 24, 34-43, 50-51, 175-176,
605-610
coeficiente de expansión térmica (CET),
43, 50
dependencia de difusión de, 175-176
energía de enlace, 41-43, 50
enlaces covalentes, 36-37, 50
enlaces de hidrógeno, 39, 50
enlaces de van der Waals, 38-39, 51
enlaces iónicos, 37-38, 50
enlaces metálicos, 35-36, 51
enlaces primarios, 34-35, 51
enlaces secundarios, 39, 51
espaciamento interatómico, 41-43, 50
límite elástico (resistencia a la fluencia),
41, 43, 51
mezclados, 39-40
módulo de elasticidad (E), 41-42, 50
no saturados, 606, 645
polimerización y, 605-610
radicales libres, 606
relación direccional de átomos, 36-37
unidades de repetición, 606, 645
- Enlace
de deformación, 686
mezclado, 39-40
por reacción, 579, 597
- Enlaces
de hidrógeno, 39, 50
de van der Waals, 38-39, 51
metálicos, 35-36, 51
primarios, 34-35, 51
secundarios, 39, 51
- Enlaces covalentes, 36-37, 50, 92-96,
102, 104
distribuciones atómicas de, 92-96
estructura atómica de, 36-37, 50
estructura cristalina de, 92-96, 102, 104
estructura cristalina de polímero, 95-96
estructura cristalina de sílice, 94-95
estructura cristalina de tetraedro,
92-93, 104
estructura cúbica del diamante (CD),
92-94, 102
- Enlazamiento (unión) de materiales,
186-188, 259-260, 280, 671-672,
685-686, 690
adhesivo, 685
compuestos laminares, 685-686
deformación, 686
delaminación, 259-260, 280, 672, 690
difusión y, 186-188
fibras, 671-672
fractura y, 259-260, 280
recubierta, 671, 690
- Envejecimiento
artificial, 463, 482
natural, 463, 482
- Epóxicos, 637
- Equilibrio de fases, 374-411
aleaciones de una fase, 376, 405
aleaciones multifase, 376, 404
aleaciones y, 376, 404-405
regla de fases de Gibbs, 376-379, 404
soluciones sólidas y, 374-411
- Erosión líquida, 880-881, 883
- Escala de longitud, 24-27, 51, 233-235
- Escasez de oxígeno, 866, 883
- Esferoidita, 499-500, 531
- Esfuerzo (σ), 8, 124-126, 131-133, 145-146,
199-202, 205-208, 216-218, 238,
271-272, 628
amplitud (σ_a), 271-272
ciclos para prueba de fatiga, 270-272
de flujo, 293
dislocaciones y, 124-126, 131-133,
145-146
ingenieril, 205-206
ley de Schmid, 131-133, 146
media (σ_m), 271-272
normal (σ), 124
Peierls-Nabarro, 126, 146
propiedades mecánicas y, 199-202,
205-208, 216-218, 238
tiempo de relajación (λ), 628
verdadero (σ), 216-218, 238
y deformación ingenieriles, 205-207, 236
- Esfuerzo cortante (τ), 124-126, 131-134,
145
dislocaciones y, 124-126, 131-134, 145
ley de Schmid, 131-133, 146
resuelto crítico (τ_{ecrc}), 133-134, 145
- Esfuerzos residuales, 304-306, 319
- Esmaltes, 572, 596
- Espaciado
interatómico, 41-43, 50
interplanar, 84, 103
- Espaciamento
entre brazos dendríticos secundarios
(EBDS), 340-343, 365
interlaminar, 430-431, 442
- Espectro
característico, 815-816, 824
continuo, 814-815, 824
electromagnético, 800-801
- Espines de electrón, 769
- Espintrónica (electrónica basada en el giro
del electrón), 782-783
- Estabilidad de
átomos y iones, 159, 161
fase en aceros aleados, 509-510
- Estabilización, 871, 883
- Estado
corroso de polímeros, 620
semejante al caucho en polímeros, 620
vítreo de polímeros, 621
- Estiramiento y doblez, 293
- Estricciones, 266-267, 281
- Estructura
cúbica del diamante (CD), 92-94,
102
de cristal de cloruro de sodio, 87-88
de cristal de fluorita, 89-90
de Widmanstätten, 456-457, 483
laminar, 424
molecular de polímeros, 602-604
subgranular polygonizada, 309-310,
319
- Estructura atómica, 22-53, 604-605,
613-619
alótropos, 24, 44-48, 50
de Buckminsterfullereno, 46, 47
desviaciones de las estructuras
electrónicas, 30-31
distribuciones atómicas de corto
alcance, 24-26, 51
distribuciones atómicas de largo
alcance, 24-25, 51
electronegatividad, 31-32, 50
energía de unión (enlace), 41-43, 50
escala de longitud, 24-27, 51
espaciado interatómico, 41-43, 50
macroestructura, 24, 27, 51
materiales amorfos, 24-26, 50
materiales cristalinos, 24-26, 50
microestructura, 24, 26, 51
micrografías, 44-48
nanoestructura, 24, 26, 51
niveles de, 24-27
número atómico, 27-30, 50
polímeros, 604-605, 613-619
principio de Aufbau, 30-31, 50
relevancia tecnológica de, 24-27
tabla periódica para, 32-34, 51
termoplásticas, 613-619
unión, 24, 34-41, 50-51
valencia, 31-51

- Estructura compacta hexagonal (CH),
70-72, 80-83
dirección de empaquetamiento cerrado,
82-83
índices de Miller para, 80-83
planos, 80-83
puntos, 70-72
- Estructura cristalina
compacta (C), 70-72, 102
cúbica centrada en el cuerpo (CCCu),
61-62, 65-66, 69
cúbica simple (CS), 61-62, 65-66, 69
de la blenda de zinc, 88-89
del corindón, 89-90
- Estructura cristalina cúbica centrada en la
cara (CCCa), 61-62, 65-66, 69-70,
82-83
direcciones compactas, 82-83
distribución de estructura compacta (C),
70
factor de empaquetamiento, 69-70
número de átomos en, 65-66
planos, 82-83
puntos, 61-62, 65-66, 69-70
- Estructura cristalina hexagonal, 69
estructuras cristalinas hexagonales,
61-62, 64
- Estructura cristalina tetraédrica, 25-26,
57, 84-86, 92-93, 104, 117-119
cúbica de diamante (CD), 92-93, 104
defectos de punto en, 117-119
niveles y propiedades atómicas,
25-26
orden de corto alcance (OCA) de,
25, 57
sitios intersticiales, 84-86, 117-119
- Estructura de banda, 719, 725-728, 759
aislantes, 727-728
brecha de energía (E_g), 726-727, 760
conducción, 727, 759
magnesio, 727
metales, 727-728
niveles de energía, 725-726
semiconductores, 727-728
sodio, 726-727
sólidos, 725-728
valencia, 726-727, 761
- Estructura de materiales, 4-6, 13, 18-19,
22-53
atómica, 22-53
ciencia e ingeniería de materiales (CIM)
y, 4-6, 19
clasificación por, 13
cristalina, 13, 18
importancia tecnológica de, 24-27
microestructura, 4-6, 18,
policristalina, 13, 18
- Estructuras
en emparedado, 677-688, 690
en panel, 688, 690
- Estructuras cristalinas, 55, 60-92, 96-100,
102, 112-153, 175-176
análisis, 96-100
ángulos interaxiales de, 63-64
base, 60-61, 102
celdas unitarias, 60, 62-72, 73-84,
102-104
compacta hexagonal (CH), 70-72,
80-82
comportamiento anisotrópico,
83-84, 102
comportamiento isotrópico, 83-84, 103
concepto de red y base, 60-61
cúbica centrada en el cuerpo (CCCu),
61-62, 65-66, 69
cúbica centrada en la cara (CCCa),
61-62, 65-66, 69-70, 82-83
cúbicas, 61-64
cúbicas simples (SC), 61-62, 65-66, 69
de estructura compacta (C), 70-72, 102
defectos en, 113-122, 135-147
densidad, 70-71, 76, 78, 102-103, 131,
145
dependencia de difusión en enlaces en,
175-176
dirección en, 68, 73-84, 103-104
dislocaciones en, 122-135, 141-145
efectos de deslizamiento en metales,
134-135
enlaces covalentes, 92-96
espaciado interplanar, 84, 103
factor de empaquetamiento, 69-70, 103
imperfecciones en, 112-153
materiales iónicos, 86-92
monoclínicas, 61-62, 64
número de coordinación, 69, 85, 102
ortorrómbicas, 61-62, 64
parámetros de red, 63-65
planos, 77-84, 103
puntos, 60-62, 65-68, 70-75, 103
puntos de red, 60-61, 103
radio atómico, 68, 85-86, 102
redes de Bravais, 60-62, 102
romboédricas, 61-62, 64
sitios intersticiales, 84-86, 103
técnicas de difracción, 96-100
tetraedro, 25-26, 57, 84-86, 92-93, 104
tetragonales, 61-62, 64
transformaciones alotrópicas, 72-73, 102
transformaciones polimórficas,
72-73, 103
triclinicas, 61-62, 64
- Estudio isoplethal, 422, 442
- Etapas de recuperación de recocido,
309-310
- Expansión de madera, 704
- Exponente de deformación-endurecimiento
(n), 293-295, 319
- Extensómetro, 205, 236
- Extractivos, 698, 714
- Extrusión, 293-294, 318, 579, 639, 641
por estirado (pultrusión), 676-677, 690
- ## F
- Facilidad de
conformación, 296, 318, 563
moldeo de metales, 544, 564
trabajo del concreto, 708, 715
- Factor de
empaquetamiento, 69-70
intensidad de esfuerzo (K), 248
seguridad, 279, 281
- Falla de Griffith, 252-254, 281
- Falla de materiales, 15, 246-289
análisis de falla de resistencia, 260-265,
281
corrosión por esfuerzo, 275-276, 281
fatiga, 15, 265-274, 281
fractura, 248-260, 281
rapidez de crecimiento de grieta,
272-274
termofluencia, 274-280
- Fallas de apilamiento, 140, 147
- Fase
dispersa (precipitado), 414, 441,
456-458, 482, 651, 690
matricial, 414, 442, 651, 690
- Fases, 376-395, 404, 412-449, 450-491, 551,
651, 653-655, 690
características de, 376-377, 414
composición de, 390-393
compuestos y, 651, 653-655, 690
diagramas de fase isomorfa para,
387-395
dispersas (precipitado), 414, 441,
456-458, 482, 651, 690
endurecimiento por dispersión, 419-420,
653-655
endurecimiento por solución sólida,
376-379, 390-391, 404
estructura de Widmanstätten, 456-457,
483
interfaz de interfases, 413
matriz, 414, 442, 651, 690
microconstituyentes, 414, 424, 429, 442
precipitado (dispersa), 414, 441,
456-458, 482
precipitado coherente, 458, 482
presencia de, 389-390
reacciones de dos fases, 387-395
reacciones de tres fases, 417-420
reacciones eutécticas, 412-449
reacciones eutectoides, 450-491
regla de Gibbs para, 376-379, 390-391,
404, 419-420
regla de la palanca para cantidad de,
393-395, 404
relaciones componentes, 376-379, 404
relaciones de energía interfacial,
457, 482

- soluciones sólidas, 380-386
transformaciones de aleaciones de cobre, 551
- Fatiga, 15, 265-274, 280-281, 304-305, 319, 865
ciclos de esfuerzo, 270-272
corrosión, 865
curva de Wöhler (S-N), 268-272, 281
efectos de la temperatura en, 274
esfuerzos residuales y, 304-305
estricciones, 266-267, 281
falla, efectos en materiales, 15, 304-305
granallado, 269, 281, 304-305, 319
grietas por, 266-267, 272-274
límite de resistencia, 268-269, 280
marcas de playa (almeja), 266-267, 280
prueba, 268-274, 281
prueba de viga en voladizo rotatoria, 268, 281
relación de resistencia, 269, 280
resistencia a la, 269, 281
sensibilidad a la muesca, 269
vida a, 289, 281
- Fenólicos, 636-637
- Fenómeno de punto de fluencia, 208-209, 239
- Fenómenos de emisión, 813-823
- Ferromagnetismo, 758, 775, 780-784, 789-792, 794
aplicaciones de, 780-784
materiales cerámicos y, 789-792
propiedades de, 775
- Ferrita, 466, 482
- Ferroelectricidad, 756-757, 760
- Ferrofluidos, estructura atómica de, 26
- Ferromagnetismo, 768, 774, 780-784, 794
- Fibras, 301, 318, 595, 665-675, 689-690, 698-699, 714
bigotes, 669, 67, 690
cantidad de, en compuestos, 666
carbonización, 673
celulosa, 698, 714
cerámica, 595
cintas, 667, 675, 690
compuestos, 665-675, 689-690
de aramida, 669, 689
delaminación, 672, 690
deposición química de vapor (DQV), 673
distribución de, 674-675
hebras, 675, 690
hilados, 674, 690
hilos, 674, 690
longitud y diámetro, 665-666
madera, 698-699
manufactura, 672-675
mecha, 674, 690
microfibrilla, 699, 714
módulo específico de, 668-669, 690
- orientación de, 666-668
plásticos reforzados *prepregs*, 675, 690
precursor (filamento), 673-674, 690
propiedades de matriz, 671
propiedades materiales, 668-672
recubierta, 671, 690
resistencia específica de, 668-669, 690
textura de, 301, 318
unión y falla de, 671-672
- Termofluencia, 274-281, 627-629, 654
ascenso (dislocación), 276-277, 280
curvas de ruptura de esfuerzo y, 278, 281
parámetro de Larson-Miller (LM), 278-279, 281
prueba de, 276-280
rapidez de, 277-278, 280
relajación de esfuerzo y, 627-628, 645
termoplástica, 627-629
tiempo de ruptura, 277-278, 281
- Fluidez de metales, 544, 564
- Flujo (*J*), difusión de átomos y, 164-165, 189
- Fluorescencia, 820, 825
- Fonones, 832, 846
- Forjado, 293-294, 318
- Formación
heterogénea de un núcleo, 364, 363
hidroplástica, 590, 597
homogénea de núcleos, 332-334, 364
por soplado y estiramiento, 59, 102, 301-302
- Formación de núcleos (nucleación), 330-336, 363-365, 452-455
cinética (rapidez) de, 452-453
crecimiento y, 352, 363, 452-455
efectos de la temperatura en, 453-455
embrión, 331-332, 363
endurecimiento por tamaño del grano, 335
endurecimiento por dispersión (segunda fase), 335, 363
heterogénea, 363, 364
homogénea, 332-334, 364
núcleos, 330-331, 364
radio crítico (r^*), 332-334, 363
rapidez de, 334-335
solidificación y, 352, 363
subenfriamiento (ΔT), 332-333, 365
transformaciones de estado sólido, 452-455
vidrios, 335-336
vidrios-cerámicos, 336, 363
- Formadores de vidrio, 583, 596
- Fotoconducción, 810, 825
- Fracción de empaquetamiento, 76-77, 103
atómico, 69-70, 103
- Fractura, 228, 237, 248-265, 281
análisis de resistencia a falla, 260-265, 281
características de microestructura de, 254-260
cerámica, 258-260
compuestos, 258-260
concooidal, 259, 280
diseño de componente y, 250
diseño de manufactura y prueba y, 250-252
estadísticas de Weibull, 260-265, 281
factor de intensidad de esfuerzo (*K*), 248
fallas y, 248-250
importancia de, para materiales, 250-254
materiales metálicos, 254-258
mecánica, 248-260, 281
prueba de impacto y, 228, 237
prueba no destructiva, 250-252
selección de material y, 250
tenacidad (K_{IC}) a la, 228, 237, 248-250
vidrios, 258-260
- Fractura dúctil, 254-257
deformación por deslizamiento, 255-256
forma transgranular de, 254-255, 281
rebajo, 254-255
- Fractura quebradiza, 252-254, 257-258
fisura de Griffith, 252-254, 281
manera intergranular de, 257, 281
materiales metálicos, 257-258
patrones Chevron, 257-258, 280
- Fuente de Frank-Read, 297-298, 318
- Fuerza motriz, 185-186, 189
- Fuerzas de London, 38, 51
- Función de error (erf), 177-178, 182
- Fundente, productos de arcilla y, 591, 596
- Fundición, 183, 338-359, 363-364, 544-545, 575, 579-580, 597, 640
aleaciones, 338-359, 363-364, 544-545
cerámica, 575, 579-580, 597
con molde a presión, 351-353, 364
con molde permanente, 351-353, 364
continua, 353-357, 363
contracción, 346-349, 365
contracción de cavidad, 346-347, 363
contracción interdendrítica, 349, 364
control de estructura de granos, 357-359
crecimiento de un monocristal, 357-359, 365
crecimiento epitaxial, 357, 359, 363
curvas de enfriamiento, 343-344
defectos de la solidificación, 346-351
descarburación con oxígeno y argón (DOA), 351, 363
difusión y, 183
en cinta, 575, 579, 597
espaciamento entre brazos dendríticos secundarios (EBDS), 340-343, 365
estructura, 344-346, 364

inversión, 351-352, 364
 ley de Sievert, 349-350, 365
 lingotes, 344-346, 353-354, 364
 mazarotas, 347-348, 365
 metales, 338-359, 363-364
 molde permanente, 351-353, 364
 polímeros, 640
 por escurrimiento, 575, 579-580, 597
 por revestimiento, 328, 351-352, 364
 porosidad de gas, 349-351, 363
 proceso a la cera perdida, 351-352, 364
 proceso de espuma perdida, 351-352, 364
 procesos para manufacturas, 351-357
 regla de Chvorinov, 338-339, 363
 sólida, 579
 solidificación direccional (SD), 357-358, 363
 tiempo de solidificación, 338-343
 zona columnar, 344-348, 363
 zona de solidificación, 344, 363
 zona equiaxial, 346, 363

G

Glasfalso, 713
 Gradiente de concentración, 165-168, 188
 Grado de polimerización, 610-612, 615, 644
 Grafito, 45-46, 528, 531
 compactado, 528
 vermicular, 528, 531
 Granallado, 269, 281, 304-305, 319
 Granos, 13, 18, 57, 103, 136, 145, 470
 Grietas, 249-250, 252-254, 266-267, 272-274, 280-281, 505-506, 531
 estricaciones, 266-267, 281
 fatiga, 266-267, 272-274
 fisura de Griffith, 252, 281
 fractura quebradiza, 252-254
 intergranulares, 257, 281
 marcas de playa (almeja), 266-267, 280
 patrones Chevron, 257-258, 280
 por temple, 505-506, 531
 rapidez de crecimiento, 272-274
 resistencia material al crecimiento de, 249-250

H

Hebras, de fibra, 675, 690
 Hemicelulosa, 698, 714
 Hierro
 al silicio, usos magnéticos de, 787-789
 en lingotes, 493, 530
 fundido blanco, 523, 526, 531
 fundido dúctil, 527-528, 530
 fundido gris, 524-525, 530
 fundido maleable, 526-527, 531
 fundido nodular, 527-528, 530
 Hierros fundidos, 523-531
 blanco, 523-526, 531

debilitamiento, 528
 desazufado, 527-528
 dúctil, 527-528, 530
 grafito compactado, 528
 grafito vermicular, 528, 531
 gris, 524-525, 530
 inoculación, 528, 530
 maleable, 526-527, 531
 nodulación, 527-528, 531
 nodular, 527-528, 530
 primera etapa de grafitización (PEG), 526, 530
 propiedades de, 528
 reacción eutéctica en, 523-524
 reacción eutectoide en, 524-528
 recocido, 524
 revenido, 527, 530
 segunda etapa de grafitización (SSG), 527, 531

Hilado, 640-641, 645

Hilados, 674, 690

Hilos, 674, 690

Horno

 básico de oxígeno (HBO), 493-494
 de arco eléctrico, 494, 530

I

Imanes permanentes (duros), 768, 783-786, 788-789
 aleaciones metálicas complejas para, 788-789
 polvo de, 784
 propiedades de, 783-786
 Imperfecciones, 112-153, 316
 defectos, 113-122, 135-147
 defectos de punto, 114-122, 146
 defectos en superficie, 135-141, 147
 deslizamiento y, 124-135, 145-146
 dislocaciones, 122-135, 141-145
 eliminación de, por trabajo en caliente, 316
 influencia de una estructura cristalina en, 134-135
 ley de Schmid, 131-135, 146
 vectores de Burgers (b), 122-128, 145

Impurezas, 115, 146

Índice de refracción (n^*), 802-804, 825

Índices de Miller, 73-75, 77-83, 103

 celdas unitarias, 73-75, 77-82, 103

 direcciones de empaquetamiento

 cerrado, 82-83

 estructuras compactas hexagonales

 (CH), 80-82

 planos (), 77-79, 80-83, 103

 puntos [], 73-75, 77-82, 103

Inductancia (B), 770-771

Inhibidores, 870, 883

Inoculación (refinamiento del grano), 335, 363-364, 528, 530

Inoculantes, 335, 364

Interacciones de

 Debye, 38, 50

 Keesom, 38-39, 51

Interdifusión, 161, 189

Interfaz de interfases, 413

Interrupción térmica, 344, 365

Intersticialmente, 120, 146

Intervalo de solidificación, 606

Iones, 24-27, 51, 54-111, 112-153, 154-195.

Véase también Configuraciones atómicas y iónicas

 configuraciones (arreglos) de, 24-27, 51, 54-111, 112-153

 estabilidad de, 159-161

 movimientos de, 154-195

Isómeros geométricos, 630-631, 644

L

Laminado, 293-294, 319

Laminados, 686

Láseres (aplicación de luminiscencia), 822-825

Latón (aleación de cobre y zinc), 550-551, 564

Lavado con gas, 350-351, 363

Ley de

 Bragg, 96-97, 102

 Curie-Weiss, 774

 Hooke, 211, 237

 Ohm, 720-725

 Schmid, 131-133, 146

 Sievert, 349-350, 365

Leyes de Fick, 164-168, 177-182, 188-189

 coeficiente de difusión (D), 165, 188

 flujo (J), 164-165, 189

 función de error (erf), 177-178, 182

 gradiente de concentración,

 165-168, 188

 perfil de composición para difusión, 177-182

 primera, 164-168, 189

 segunda, 177-182, 189

 velocidad de difusión, 164-168

Lignina, 698, 714

Límite

 de longitud de onda corta, 815, 825

 de resistencia, 268-269, 280

 de solubilidad, excedente, 420-423

 elástico, 208, 236

 proporcional, 208, 238

Límite elástico (resistencia a la fluencia), 8,

 41, 43, 51, 136-137, 147, 203-204,

 208-210, 239

 estructura atómica y, 41, 43, 51

 límites de grano y, 136, 137, 147

 plástico de Bingham y, 203-204, 239

 propiedades mecánicas y, 203-204,

 208-210, 239

- prueba a la tensión para, 208-210
valor de deformación compensado, 208, 237
- Límites**
de giro, 139, 147
de inclinación, 139, 147
de macla, 140, 147
- Límites de grano**, 13, 18, 57, 103, 136-139, 145-147, 580-581
análisis de imagen, 138, 146
ángulo pequeño, 139, 146
cerámica sinterizada, 580-581
defectos en superficie, 136-139, 145
ecuación de Hall-Petch para, 136-137, 146
endurecimiento por tamaño del grano, 142-143, 146
estructura de material cristalino, 13, 18, 57, 103
metalografía, 138, 146
microscopia óptica para, 138
número de la ASTM de tamaño de grano, 138-139, 145
ranurado térmico, 138, 147
resistencia a la fluencia (límite elástico), 136-137, 147
- Línea de conexión**, 391-392, 405
- Lingotes**, 344-346, 353-354, 364
contracción en, 344-346
proceso de fundición, 353-354, 363
- Lixiviado**, corrosión química por, 853
- Luminiscencia** (interacciones de la capa electrónica exterior), 820, 822-825
- M**
- Macro dureza**, 221, 237
- Macroestructura**, 24, 27, 51
- Macrosegregación**, 401, 404
- Madera**, 698-705
capas, 705, 715
coeficiente dimensional de, 704
contenido de humedad, 700-701
contrachapada (triply), 705
densidad, 700-701
dura contra blanca, 700
estructura celular, 699
estructura de fibra, 698-699
expansión y contracción de, 704
macroestructura, 699-700
propiedades mecánicas de, 702-703
- Magnesio**, estructura de banda de, 727
- Magnetización** (M), 770-773, 794
por saturación, 777-778, 794
- Magnetón de Bohr** (μ_B), 768-769, 793
- Magnetorrestricción**, 792
- Marcas de playa** (almeja), 266-267, 280
- Martensita**, 475-479, 482
aceros, 475-478, 483
aleaciones, 475, 479
- revenido, 477-478, 483
- transformaciones atómicas (displacivas), 475, 482
- Masa atómica** (M), 27, 50
- Materiales**, 4-19, 56-59, 102-103, 141-144, 196-245, 246-289, 868-874. *Véase también* Materiales de construcción; Propiedades mecánicas de materiales; Propiedades físicas de materiales
- adelgazados por cortante (seudoplásticos), 202-203, 238
- aeroespaciales, 12
- aleaciones, 7-8, 18
- amorfo, 57-60, 102
- anelásticos (viscoelásticos), 200, 236
- biomédicos, 12
- cerámicos, 7-9, 18, 258-260
- clasificación de, 7-13, 59
- clasificación funcional de, 11-13
- composición de, 4-6, 18
- compuestos, 7-8, 10, 18, 258-260
- configuraciones atómicas e iónicas de, 56-59
- corrosión, medidas de protección contra, 868-874
- cristalinos, 13, 18, 57-59, 102
- cristalización de, 59-60, 102
- densidad, 16, 18
- dilatantes (engrosamiento por cortante), 202-203, 236
- diseño de componentes y métodos de manufactura, 250-252
- efectos ambientales en, 13-16
- electrónicos, 12, 143-144
- engrosados por cortante (dilatadores), 202-203, 238
- estadísticas de Weibull para, 260-265
- estructurales, 13
- falla de, 246-289
- fatiga, 265-274
- ferroeléctricos, 141, 145
- fosforescentes, 820, 825
- fotónicos, 12
- gases monoatómicos, 56
- imperfecciones, efectos de, en, 141-144
- inteligentes, 12-13, 19, 479, 483
- magnéticos, 12, 143-144
- mecánica de fracturas y, 250-260
- metales, 7-8, 18
- metálicos, 254-258
- nanocompuestos, 651-653, 690
- nanocompuestos híbridos, orgánicos e inorgánicos, 651, 690
- newtonianos, 202-203, 237
- no newtonianos, 202-203, 237
- ópticos, 12, 143-144, *Véase* Materiales fotónicos
- orden de corto alcance (OCA) en, 24-26, 51, 56-57, 104
- orden de largo alcance (OLA) en, 24-25, 51, 56-58, 103
- policristalinos, 13, 18, 57-58, 103
- polímeros, 6-10, 19
- procesamiento de, 4-6, 19
- relación de resistencia a peso, 9, 16, 19
- resistencia de, 8
- selección de, 16-17, 250, 871-874
- semiconductores, 7-10, 19
- sensibles a microestructura, 720, 760, 780-781, 839
- seudoplásticos (adelgazamiento por cortante), 202-203, 238
- sin orden atómico en, 56
- síntesis de, 4-6, 19
- tecnología ambiental, 12
- tecnología de energía, 12
- termofluencia, 274-281
- vidrio y cerámica, 9, 18
- vidrios, 7-9, 18, 258-260
- viscosos, 200-201, 238
- Materiales amorfo**, 24-26, 50, 55, 57-60, 102
aleaciones, 59-60
configuración atómica e iónica de, 55, 57-60, 102
cristales líquidos (CL), 58, 103
cristalización de, 59-60
estructura atómica de, 24-26, 50
metales, 59-60
orden de corto alcance (OCA) de, 24-26, 56-57
plásticos, 59
vidrios, 58-59
vidrios metálicos, 59-60
vidrios-cerámicos, 59
- Materiales cristalinos**, 13, 18-19, 24-26, 50, 57-59, 94-96, 102-103, 234-235, 616, 619, 622-624, 629
clasificación como, 13, 18-19, 59
cristales líquidos (CL), 58, 103
cristalización inducida por esfuerzo, 619
deformación de polímeros, 616, 629
dislocaciones y, 234-235
distribución atómica de, 57-59, 102-103
estructura atómica de, 24-26, 50
granos, 13, 18, 57
límites de grano, 13, 18, 57, 103
modelo de cadena plegada, 622
monocristales, 13, 19, 57-58
observación y medición de, 622-624
orden de largo alcance (OLA) de, 57-58
policristalinos, 13, 19, 57-58, 103
polímeros, 95-96, 616, 622-624, 629

- propiedades mecánicas de, 234-235
 sílice, 94-95
 técnicas de difracción para, 58, 96-100, 102-104
 termoplásticos, 616, 619, 622-624, 629
- Materiales de construcción, 696-717**
 asfalto, 713
 concreto, 705-713
 densidad específica de, 703
 madera, 698-704
 madera contrachapada (triplay), 705
 módulo específico de, 703
 tecnología avanzada y, 697-698
- Materiales elásticos, 131, 146, 199-201, 211-213, 625**
 deformación, 131, 146, 199-200, 625
 dislocaciones y, 131, 146
 Ley de Hooke, 211, 237
 módulo de resiliencia (E_r), 213, 237
 módulo de Young (E), 199-200, 211-213, 239
 propiedades mecánicas de, 199-201, 211-213
 prueba de tensión para, 211-213
 relación de Poisson (ν), 213, 238
 rigidez, 211-213, 238
 termoplásticos, 625
- Materiales electrónicos, 12, 30-31, 143, 718-765**
 aislantes, 722-723, 727-728, 750
 aplicaciones de, 12, 719-720
 clasificación de, 722-723
 conductividad de, 720-725, 729-732, 748-750
 conductores, 722-723
 deposición de película delgada, 746-748
 dieléctricos, 722-723, 751-755
 dopantes, 720, 737-739, 759
 electrorrestricción y, 755, 759
 estructura atómica, desviaciones de, 30-31
 estructura de banda, 719, 725-728, 759
 ferroelectricidad y, 756-757, 760
 imperfecciones, efectos de, en, 143
 Ley de Ohm, 720-725
 piezoelectricidad y, 755-756, 760
 procesamiento de circuito integrado (CI), 743-746
 resistividad de, 720-721
 semiconductores, 720, 722-723, 727-728, 733-743, 760
 superconductores, 720, 722-723, 761
 unidades para, 720, 732
- Materiales fotónicos, 12, 798-829**
 absorción de, 800-801, 807-808, 813, 824
 aplicaciones de, 12
 colores de dopado de iones, 813
 comportamiento fotónico, 800-813
 diodos emisores de luz (LED), 799, 811-813, 821-822, 825
 electroluminiscencia, 821-822, 825
 emisión térmica, 822-823, 825
 espectro electromagnético, 800-801
 fenómenos de emisión, 813-823
 láseres (amplificación de luminiscencia), 822-825
 luminiscencia (interacciones de la capa exterior de electrones), 820-822, 825
 propiedades selectivas de, 813
 rayos gamma (interacciones nucleares), 814
 rayos x (interacciones de la capa interior de electrones), 814-819, 825
 reflexión, 800-801, 806, 803, 825
 sistemas de comunicación por fibra óptica, 823-824
 transmisión, 800-801, 808-811, 813
- Materiales iónicos, 86-92, 748-749**
 conductividad en, 748-749
 estructura de blanda de zinc, 88-89
 estructura de cloruro de sodio, 87-88
 estructura de corindón, 89-90
 estructura de fluorita, 89-90
 estructuras cristalinas de, 86-92
 neutralidad eléctrica, 86
 poliedros aniones y, 87
 radio iónico, 86
- Materiales magnéticos, 12, 143, 766-797**
 aleaciones, 787-789
 almacenamiento de datos, 782-783
 antiferromagnetismo, 768, 774-775, 793
 aplicaciones y propiedades de, 780-786
 blandos, 780-782
 campos, 770-773, 777-779
 cerámicos, 789-792
 ciclos de histéresis, 778-779, 780-784, 794
 cinta, 788
 clasificación de, 768
 diamagnetismo, 773, 793
 dipolos, 768-770
 dominios, 775-779, 793
 duros (permanentes), 768, 783-786
 ferrimagnetismo, 758, 775, 780-784, 789-792, 794
 ferromagnetismo, 768, 774, 780-784, 794
 imperfecciones, efectos de, en, 143
 magnetización, 770-773
 magnetorrestricción, 792
 metálicos, 787-789
 momentos, 768-770
 paramagnetismo, 768, 773-774, 794
 permanentes (duros), 768, 783-786
 permeabilidad, 770-773
 superparamagnetismo, 758, 775, 794
 temperatura de Curie (T_C), 774, 779, 793
 unidades de, 770-771
- Materiales policristalinos, 13, 18, 57-58, 103, 135**
 deslizamiento cruzado, 135
 orden de largo alcance (OLA) de, 57-58
- Materiales viscoelásticos (anelásticos), 200-201, 238, 624-625, 645**
 propiedades mecánicas de, 200-201, 238
 termoplásticos, 624-625, 645
- Mazarotas, 347-348, 365**
- Mecánica de fallas y fractura, 248-250**
- Mecha, 674-690**
- Mero, 601, 645**
- Metal caliente, 493, 530**
- Metales, 7-8, 18, 26, 58-60, 103, 134-135, 293-297, 314-319, 338-359, 360-361, 544, 562-564, 686, 687, 690, 727-732, 787-789, 840-841, 852-853, 855, 859-860, 875-878, 888-890. Véase también Aleaciones materiales amorfos como, 59-60**
 aplicaciones y propiedades de, 7-8, 18
 chapado, 686, 687, 690, 859-860
 chapados (revestimiento), 686, 687, 690
 conductividad de, 729-732
 conductividad térmica de, 840-841
 configuraciones atómicas de, 59-60
 corrosión de, 852-853, 855, 859-860, 875-878
 efecto Bauschinger, 297, 318
 efectos de deslizamiento en, 134-135
 estructura atómica de, 26
 estructura de banda de, 727-728
 exponente de endurecimiento por deformación (n), 295-296, 319
 facilidad de moldeado, 544, 564
 fluidez de, 544, 564
 fundición, 338-359
 líquidos, ataque en materiales, 852
 lixiviado de aleaciones, 853
 materiales magnéticos, 787-789
 oxidación de, 855, 875-878
 preciosos, 563-564
 procesos de unión, 314-315, 360-361
 propiedades físicas de, 888-890
 recuperación elástica, 296-297
 refractarios, 562-563
 solidificación de, 314-319, 338-359, 360-361
 solidificación rápida de, 59, 103
 trabajo en caliente, 315-318
 trabajo en frío, 293-297, 318-319
- Metalografía, 138, 146**
- Método Laue de difracción, 96-97**
- Microcavidades, 629-630, 644**

- Microconstituyentes, 414, 424, 429, 431-432, 442-443, 468-469
cantidades de, 430-438
eutécticos, 424, 442
eutectoides, 468-469
primarios, 429, 443, 468-469
primarios (proeutécticos), 429, 443
- Microcontracción, 349, 364
- Microdureza, 223, 237
- Microestructura, 4-6, 18, 24, 26, 51, 254-260, 301-306, 459-462
cerámica, 258-260
ciencia e ingeniería de materiales (CIM) y, 4-6, 18
comportamiento anisotrópico, 301-303
compuestos, 258-260
desarrollo de textura en película delgada, 303-304
escala de longitud, 24, 26
esfuerzos residuales, 304-306, 319
estructura atómica, 24, 6, 51
evolución del endurecimiento por envejecimiento (precipitación), 459-462
fractura, características de, 254-260
materiales metálicos, 254-258
procesos de deformación y, 301-306
vidrios, 258-260
- Microfibrillas, 699, 714
- Micrografías, 44-48, 129-130, 138-139, 145-147, 304, 318
metalografía, 138, 146
microscopio de barrido de efecto túnel (STM), 47-48
microscopio de fuerza atómica (MFA), 46
microscopio de orientación, 304, 318
microscopio electrónico de transmisión (MET), 44-45, 129-130, 147
microscopio óptico, 138
número ASTM de tamaño de grano, 138-139, 145
poros de ataque químico, 129-130, 138, 145
ranurado térmico, 138, 147
- Microscopia de orientación, 304, 318
- Microscopio
de barrido de efecto túnel (STM), 47-48
de fuerza atómica (MFA), 46
óptico, 138
- Microscopio electrónico de transmisión (MET), 44-45, 99-100, 104, 129-130, 147
análisis de la estructura de un cristal usando, 99-100, 104
dislocaciones observadas usando, 129-130, 147
micrografías de estructura de un cristal usando, 44-45
técnica de difracción usando, 99-100, 104
- Microsegregación, 401-402, 404
- Microvacíos, 255, 281
- Modificación de microestructuras, 432-433, 442
- Módulo de
corte (G), 200, 238
elasticidad (E), 8, 41-42, 51, 200, 237, 661-663. Véase también Módulo de Young
específico, 668-669, 690, 703
flexión, 219, 237
resiliencia (E_r), 213, 237
ruptura (resistencia a la flexión), 218-221, 237
- Módulo de Young (E), 8, 41-42, 199-200, 211-213, 239, 661-663
compuestos reforzados con fibras, 661-663
deformación elástica y, 199-200, 211-213
estructura atómica y, 41-42
propiedades mecánicas y, 199-200, 211-213, 239
- Moldeo
de arena verde, 328
de transferencia, 641-642
por compresión, 640, 642
por escurrimiento, 575, 579-580, 597
por inyección, 579, 597, 639, 641
por inyección de reacción (MIR), 641
por soplado, 639, 641
- Momentos, magnéticos, 768-770
- Monel, 553, 564
- Monómero, 601, 645
- Mortero, 705, 715
- Motivo, 60-61, 102
- Movilidad (m), 721, 760
- Movimiento, dislocaciones y, 124-130
- Movimientos de átomo y ion, 154-195
difusión y, 155-159, 161-188
difusividad (D), 165, 168-173, 188
energía de activación (Q), 159-161, 163-164, 188
estabilidad de, 159-161
flujo (J), 164-165, 189
gradiente de concentración, 165-168, 188
leyes de Fick, 164-168, 177-182, 188-189
perfil de composición de, 177-182
permeabilidad de polímeros, 176-177, 189
procesamiento de materiales y, 182-188
rapidez de difusión de, 164-168
- Nanoalamabres, 438-442
- Nanociencia, 24
- Nanoestructura, 24, 26, 51
- Nanoindentación, 223-226, 237
- Nanotecnología, 24, 51
- Neutralidad
de carga, 737-739
eléctrica, materiales iónicos, 86
- Nitinol, 475
- Nitruración, 156, 189, 516-517, 531
- Niveles de estructura atómica, 24-27
- Nodulación (formación de nódulos), 527-528, 531
- Normalización, 498-499, 531
- Notación de Kroger-Vink, 120-122, 146
- Núcleos, 330-331, 364
- Número
ASTM de tamaño de grano, 138-139, 145
atómico, 27-30, 50
de Avogadro (N_A), 27, 50
de coordinación, 69, 85, 102
- O**
- Oligómeros, 601, 645
- Orden de
corto alcance (OCA), 24-26, 51, 56-57, 104
largo alcance (OLA), 24-25, 51, 56-58, 103
- Orificios, 721-722, 760
- Oxidación, 157, 563, 853, 855-856, 875-879, 883
aluminio, 157
cerámica, 853
corrosión y, 853, 855, 875-879
metales, 855, 875-878
polímeros, 878-879
reacción, 876, 883
reacciones de ánodo y, 855
relación de Pilling-Bedworth (P-B), 876-877, 883
- Óxido intermedio, 583, 597
- Óxidos, 583-584, 596-597, 749
conductividad y, 749
formadores de vidrio, 583, 596
intermedios, 583, 596
iónicamente conductores, 749
vidrios de silicato, 583, 597
vidrios modificados de silicato, 583-584, 596
- P**
- Paramagnetismo, 768, 773-774, 794
- Parámetro de Larson-Miller (LM), 278-279, 281
- Paredes de Bloch, 776-777, 793
- Parisón, 585, 597, 639
- Pasivación, 871, 883
- Patrones Chevron, 257-258, 280
- Películas delgadas, 157, 303-304, 594-595, 746-748
deposición electrónica, 747, 761
desarrollo de textura en, 303-304
electrodeposición, 748, 759

- Perlita, 467-468, 470-472, 482
 colonias, 470
 deposición de, 746-748
 deposición física de vapor (DFV), 747, 760
 deposición química de vapor (DQV), 594, 747-748, 759
 diagramas de tiempo-temperatura-transformación (TTT), 470-472
 estructura laminar de, 467-468, 482
 formación de núcleos y crecimiento de fases en, 472
 prevención de difusión usando, 157
 procesos de producción de cerámica, 594-595
 rapidez de enfriamiento de, 470-471
 Permeabilidad (μ), 176-177, 189, 770-773, 794
 magnética, 770-773, 794
 polímeros, 176-177, 189
 Permitividad, 754, 760
 Pico de endurecimiento secundario, 514, 531
 Piezoelectricidad, 755-756, 760
 Planos, 77-84, 103, 124-126, 146
 basales, 82-83, 102
 celda unitaria, 77-83, 103
 construcción de, en celda unitaria, 79-80
 densidad planar, 78, 103
 deslizamiento, 124-126, 146
 dirección de una forma o familia { }, 78, 103
 direcciones compactas, 82-83
 espaciado interplanar, 84, 103
 estructura compacta hexagonal (CH), 80-83
 estructura cristalina, 77-83, 103
 estructura cúbica centrada en la cara (CCCa), 82-83
 índices de Miller (), 77-78, 80-83, 103
 secuencia de apilamiento, 82-83
 Plásticos, 9, 19, 59-60, 104, 157, 601, 645,
 Véase también Polímeros
 Bingham, 203-204, 236
 botellas de refresco creadas por difusión, 157
 clasificación atómica de, 59-60, 104
 cristalización de, 59
 cristalización inducida por esfuerzo, 59, 104
 formación por soplado y estiramiento, 59
 material amorfo, como, 59-60, 104
 polimerización de, 9-10, 19
 Polarización, 751-755, 861-863
 activa, 862, 882
 corrosión y, 861-863
 de concentración, 862, 882
 de resistencia, 862, 883
 dieléctricos, 751-755
 directa, 741, 760
 inversa, 741, 760
 Poliedros de anión, 87
 Poliésteres, 608, 637
 Poliimidas, 637
 Polimerización, 9-10, 19, 601, 605-612, 615, 621-623, 644
 adición, 605-608, 621, 644
 comportamiento molecular y, 9-10
 de condensación, 605, 608-610, 621, 644
 de crecimiento por pasos, 608
 efectos de la temperatura de transición vítrea (T_g), 621-623
 grado de, 610-612, 615, 644
 por adición, 605-608, 621, 644
 terminación de, 606-607
 Polímeros, 6-10, 19, 95-96, 176-177, 189, 359-360, 364-365, 601-649, 658-660, 749-750, 842, 853, 874, 878-879
 adhesivos, 637-638
 aplicaciones de, 7, 9, 601-602
 atácticos, 616-617
 biodegradables, 874
 calandrado, 640-641
 clasificación de, 602-605
 colado, 640
 comerciales (artículo estándar), 602
 compuestos, 658-660
 conductividad en, 749-750
 conductividad térmica de, 842
 copolímeros, 617-618, 644
 corrosión de, 853, 874, 878-879
 crecimiento de cristal de esferulita, 359-360, 365
 crecimiento laminar de un cristal, 359, 364
 cristalinidad en, 516, 622-624, 629
 cristalinos líquidos (PCL), 617-618, 644
 degradación microbiana, 7-10, 19
 degradación térmica de, 878-879
 difusión y, 176-177, 189
 efectos de la temperatura, 619-624, 629
 elastómeros (cauchos), 603-604, 630-635, 644
 elastómeros termoplásticos (TPE), 604, 634-635, 645
 estructura atómica de, 604-605, 613-619
 estructura cristalina, 95-96
 estructura molecular de, 602-604
 extrusión, 639, 641
 hilado, 640-641, 645
 isotácticos, 616-617
 lineal, 602-603, 644
 líquidos, 620
 moldeo de inyección por reacción (MIR), 641
 moldeo por compresión, 640, 642
 moldeo por inyección, 639, 641
 moldeo por soplado, 639, 641
 moldeo por transferencia, 641-642
 monómero, 601, 645
 oligómeros, 601, 645
 oxidación de, 878-879
 permeabilidad de polímeros, 176-177, 189
 plásticos, 9, 19, 601, 645
 procesamiento de materiales, 638-642
 procesos de moldeo, 639-642
 productos de espuma, 641-642
 propiedades materiales de, 7-10, 19
 ramificados, 602-603, 644
 reciclado, 643
 relación resistencia a peso, 9, 19
 semiconducción, 6-7
 semiconductores, 6-7
 solidificación de, 359-360
 termoestables (termofijos), 9-10, 19, 602-604, 635-637, 645
 termoformado, 639-641
 termoplásticos, 9-10, 19, 602-603, 612-630, 645
 Polvos, 183-185, 189, 401-402, 405, 575-580, 597
 compactación, 576-579
 comprimido en caliente, 401, 404, 577-579, 596
 metalurgia de, 183-184, 189, 575, 597
 prensado isostático en caliente (PIC), 401-402, 404, 577-579, 596
 prensado isostático en frío (PIF), 576-577, 596
 procesamiento de, 575-580, 597
 rápidamente solidificados, 401-402, 405
 sinterización de, 183-185, 189, 576-579, 597
 Polvos cerámicos, 575-580, 597
 compactación de, 576-578
 extrusión, 579
 fundición en cinta, 575, 579, 597
 fundición por escurrimiento, 575, 579-580, 597
 moldeo por inyección, 579, 597
 prensado en caliente, 577-579, 596
 prensado isostático en caliente (PIC), 577-579, 596
 prensado isostático en frío (PIF), 576-577, 596
 secado por aspersión, 575, 597
 sinterizado, 575, 577-579, 597
 síntesis y procesamiento de, 575-580
 Porcentaje de
 elongación, 214, 237
 reducción en área, 214, 237
 trabajo en frío (%TF), 299-301
 Poros de ataque químico, 129-130, 138, 145
 Porosidad
 aparente, 581, 596
 en materiales cerámicos, 581-582, 596

- gaseosa, 349-351, 363
verdadera, 581, 597
- Potencia, magnética, 784
- Potencial de electrodo, 857-861, 882
chapado metálico y, 859-860
efectos de concentración en, 858-859
rapidez de corrosión y, 859-861
serie de fuerzas electromotrices (fem), 857-858, 882
- Precipitados (fase dispersa), 414, 441, 456-458, 461-462, 482
coherentes, 458, 482
reacciones eutécticas, 414, 441
reacciones eutectoides, 456-458, 461-462, 482
sin equilibrio, 461-462
zonas de Guinier-Preston (GP), 461-462, 482
- Precisión dimensional, 316
- Precursor (filamento), 673-674, 690
- Preformar, 359-360, 364
- Preformas, 675, 690
- Prensado isostático en frío (PIF), 576-577, 596
- Primera etapa de grafitización (PEG), 526, 530
- Principio de Aufbau, 30-31, 50
- Procesamiento
de circuitos integrados (CI), 743-746
de deformación, 293-294, 313-315, 318
primario usando solidificación, 330, 364
secundario usando solidificación, 330, 355, 364
termoquímico, 319
- Procesamiento de materiales, 142, 145, 147, 198-199, 237, 290-327, 335, 340-343, 351-357, 575-580, 597, 638-642, 672-677, 685-686, 731-732
calandrado, 640-641
compactación de, 576-578
compuestos, 671-677, 685-686
conductividad, efectos en, 731-732
deformación, 293-294, 313-315, 318
dislocaciones y, 142, 145, 147
efectos de solidificación en, 340-343
endurecimiento por deformación, 142, 147, 290-308
extrusión, 293-294, 318, 579, 639, 641
fibras, 672-675
forjado, 293-294, 318
fundición, 351-359, 575, 579-580, 597, 639-642
hilado, 640-641, 645
laminación, 293-294, 319
microestructuras de materiales de, 301-306
películas delgadas, desarrollo de textura en, 303-304
polímeros, 638-642
polvos cerámicos, 575-580, 597
- prensado en caliente, 577-579, 596
prensado isostático en caliente (PIC), 577-579, 596
prensado isostático en frío (PIF), 576-577, 596
productos de espuma, 641-642
propiedades mecánicas y, 198-199, 237
recocido, 142, 305-306, 308-315
revenido, 293-294, 318
servicio a alta temperatura, 314
solidificación rápida, 335, 340-341
templado, 305-306, 319
termoformación, 639, 641
trabajo en caliente, 315-318
trabajo en frío, 292-308
trabajo en tibio, 312, 319
unión, 314-315, 360-361, 671-672
- Proceso de
cera perdida, 351-352, 364
espuma perdida, 351-351, 364
fundición continua, 353-357, 363
fusión, difusión y, 183
- Proceso de solidificación rápida, 59, 103, 335, 340-341, 401-402, 404-405
aleaciones, 59, 103, 401-402, 404-405
atomización por rocío, 401-402, 405
endurecimiento por solución sólida y, 401-402, 404-405
metales, 59, 103
polvos (solidificados rápidamente), 401-402
prensado en caliente (PC), 401, 404
prensado isostático en caliente (PIC), 401-402, 404
vidrios, 59, 103, 335, 364
vidrios metálicos, 59, 103
- Procesos de fundición, 579, 597, 639-642
- Procesos de revenido, 293-294, 318, 527, 530
alambre, 293-294, 318
hierro fundido, 527, 530
- Procesos de unión, 259-260, 280, 314-315, 360-361, 595, 671-672, 685-686, 690
componentes cerámicos, 595
enlace, 259-260, 280, 671-672, 685-686, 690
recocido y, 314-315, 319
soldadura, 314-315, 360-361
soldadura blanda, 360, 365
soldadura fuerte, 360, 363, 686
solidificación y, 360-361
zona afectada por el calor (ZAC), 314-315, 318
zona de fusión, 360-361, 363
- Productos
de arcilla, procesamiento y aplicaciones de, 590-591
horneado de arcilla, 591, 596
para secado de arcilla, 590-591
- Propiedades
físicas de materiales, 16, 19, 888-890
matriciales de fibras, 671
ópticas, efectos de imperfecciones en, 143
- Propiedades mecánicas de materiales, 16, 19, 141-143, 196-245, 246-289, 395-397, 574-575, 624-630, 644-645, 702-703
análisis de curvatura de oblea, 233-235
análisis de falla de resistencia, 260-265, 281
cerámica, 574-575
coloreado, 630, 644
comportamiento al impacto, 227-230, 237, 629
comportamiento elástico, 199-201, 211-213, 625
comportamiento quebradizo, 218-221, 236
comportamiento reopéctico, 204
comportamiento tixotrópico, 204
comportamiento viscoelástico (anelástico), 200-201, 236, 238, 624-625, 645
comportamiento viscoso, 200-201, 238
control de deslizamiento para, 141-142
corrosión por esfuerzo, 275-278, 281
defectos, efectos en, por 141-143
deformación (ϵ), 199-203, 205-208, 216-218, 238
deformación elástica, 200-201, 236
deformación plástica, 200-201, 238, 625-627
diagramas de esfuerzo-deformación, 204-216, 229-230
diagramas de fases y, 395-397
distribución de Weibull, 260-265, 281
ductilidad, 214-215, 236, 254-257
dureza, 221-223, 237
efectos de la temperatura, 215-216, 274
elastómeros (caucho), 200-201, 236
escalas de longitud pequeñas, 233-235
esfuerzo (σ), 199-202, 205-208, 216-218, 238
esfuerzo y deformación verdaderos, 216-218, 238
fatiga, 265-274, 281
importancia tecnológica de, 198-199
madera, 702-703
material newtoniano, 202-203, 237
materiales no newtonianos, 202-203, 237
mecánica de fracturas, 248-260, 281
microcavidades, 629-630, 644
módulo de Young (E), 200, 211-213, 239
nanoindentación, 223-226, 237
plásticos de Bingham, 203-204, 236
prueba a la tensión para, 204-216, 238
prueba de flexión para, 218-221, 236
rapidez (velocidad) de deformación, 200, 227-228, 238

- rapidez de crecimiento de grieta, 272-274
- rapidez de deformación cortante, 202-203, 238
- relación de resistencia a peso, 16, 19
- relajación de esfuerzo, 627-628, 645
- resistencia a la fluencia (límite elástico), 203-204, 208-210, 239
- resistencia a la tensión, 209-211, 238
- sensibilidad a la muesca, 229, 237
- temperatura de transición de dúctil a quebradizo (TTDQ), 228-230, 236
- tenacidad a la tensión, 213-214, 228, 238
- termofluencia, 274-279, 280, 627-629
- termoplásticas, 624-630
- vidrios metálicos voluminosos, 231-233
- viscosidad (η), 202-203, 238
- Propiedades térmicas de materiales,** 830-849
 - aplicaciones de, 831
 - calor específico, 832-834, 846
 - capacidad calorífica, 832-834, 846
 - conductividad (k), 839-843, 846
 - expansión, 834-839, 846
 - impacto, 843-846
- Protección catódica,** 870-871
- Prueba**
 - Brinell de dureza, 222-223
 - Charpy, 227
 - de dureza de Knoop (DK), 222-223
 - de dureza Rockwell (DR), 222
 - de dureza Vickers, 222-223
 - de flexión, 218-221, 236
 - de Izod, 207
 - de viga en voladizo rotatoria, 268, 281
- Prueba de tensión,** 204-216, 236-239
 - carga (F), 204-205, 235
 - comportamiento elástico, 211-213
 - diagramas esfuerzo-deformación para, 204-216
 - ductilidad, 214-215, 236
 - efectos de temperatura en, 215-216
 - esfuerzo y deformación ingenieriles, 205-207, 236
 - propiedades mecánicas a partir de, 208-216
 - rebajo, 209-210
 - resistencia, 209-211, 238
 - resistencia a la fluencia, 208-210, 239
 - rigidez, 211-213, 238
 - temperatura de transición vítrea (T_g), 205, 237
 - tenacidad, 213-214, 238
 - unidades para resultados de, 207-208
- Pruebas no destructivas,** 250-252
- Punto triple para condiciones de equilibrio,** 378-379, 405
- Puntos,** 60-62, 65-68, 70-75, 103
 - celda unitaria, 65-68, 73-75, 103
 - de coordenadas, 73-74
 - de red, 60-62, 65-68, 103
 - densidad lineal, 76, 103
 - dirección de una forma o familia $\{ \}$, 75, 103
 - direcciones compactas, 68
 - estructura compacta hexagonal (CH), 70-72
 - estructura cristalina, 60-62, 65-68, 70-75, 103
 - índices de Miller $[]$, 73-75, 103
 - número de, 65-67
- R**
 - Radicales libres, 606
 - Radio, 68, 85-86, 102, 891-892
 - atómico, 68, 85-86, 102, 891-892
 - crítico (r^*), 332-334, 363
 - iónico, 86, 891-892
 - parámetros de red y, 68
 - sitios intersticiales, 85-86
 - Ramificación, 618
 - Ranurado térmico, 138, 147
 - Rapidez de
 - corrosión, 859-861
 - formación de núcleos (nucleación), 334-335
 - Rapidez de deformación, 15, 200, 227-228, 237-238
 - comportamiento al impacto y, 200, 227-228, 237
 - comportamiento dúctil y, 200, 238
 - efectos en materiales, 15
 - por cortante, 202-203, 238
 - Rayos gamma (interacciones nucleares), 814
 - Rayos x (interacciones de la capa electrónica interior), 814-819, 825
 - Razón de resistencia, 269, 280
 - Reacción
 - de reducción, 855, 883
 - monotética, 418-419, 443
 - peritética, 418-419, 443
 - peritectoide, 418-419, 443
 - Reacciones
 - de tres fases, 417-420
 - químicas por imperfecciones, 121-122, 145
 - Reacciones eutécticas, 412-449, 523-524
 - aleaciones, 414, 420-435
 - cantidad microconstituyente, 431-432
 - compuestos intermetálicos, 414-417, 442-443
 - diagramas de fase eutéctica, 415-417, 420-430, 442
 - endurecimiento por dispersión y, 412-449
 - espaciamiento interlaminar, 430-431, 442
 - hierros fundidos, 523-524
 - microestructura de, 432-435
 - modificación de, 432-433, 442
 - nanoalambres, 438-440
 - procesamiento de materiales y, 436-437
 - solidificación sin equilibrio, 438
 - tamaño de colonia, 430
 - Reacciones eutectoides, 450-491, 524-528
 - acero, 459, 468-469, 475-478, 482-483
 - aleaciones, 456-458, 464-465
 - aleaciones con memoria de forma (AMF), 479-480, 482
 - austenita, 466-467, 470, 482
 - bainita, 472-473, 482
 - cementita, 466, 482
 - compuestos, 466
 - control de las, 466
 - diagramas de fase binaria para, 465-468
 - diagramas de tiempo-temperatura-transformación (TTT), 470-475, 483
 - endurecimiento (precipitación) por envejecimiento, 458-465, 482-483
 - estructura Widmanstätten, 456-457, 483
 - ferrita, 466, 482
 - hierros fundidos, 524-528
 - martensita, 475-479, 482
 - microconstituyentes primarios, 468-469
 - perlita, 467-468, 470-472, 482
 - precipitados coherentes, 458, 482
 - relaciones interfaciales de energía, 457, 482
 - soluciones sólidas, 466, 463
 - temperatura de enfriamiento de, 470-471
 - transformaciones de fase de estado sólido, 452-455
 - Rebajo, 209-210, 237, 254-255, 625-626
 - Recalescencia, 344, 364
 - Reciclado de polímeros, 643
 - Recocido, 142, 145, 305-306, 308-315, 498-499, 500-501, 524, 529
 - acero, 498-499, 500-501, 529
 - alivio de esfuerzos internos, 304, 319
 - austenitización, 498, 530
 - control de, 311-313
 - crecimiento de granos, 310-313
 - dislocaciones y, 142, 145
 - efectos de temperatura en, 311-312, 314
 - esfuerzos residuales y, 305-306, 319
 - etapas de, 308-311
 - hierro fundido, 524
 - isotérmico, 500-501
 - microestructuras de materiales de, 301-306
 - normalización y, 498-499, 531
 - para alivio de esfuerzos internos, 304, 319
 - por templado, usando prevención de corrosión, 871
 - procesamiento de deformación, 313-315, 318

- procesamiento de materiales, 305-306, 308-315
 proceso, 498, 531
 procesos de trabajo en frío y, 308-314
 procesos de unión, 314-315
 punto de, 305
 recristalización, 310-313, 319
 recuperación, 309-310
 revenido en la fase austenítica, 500, 530
 tamaño de grano recristalizado y, 312-313, 319
 tratamiento térmico por, 498-499, 500-501, 529
 vidrio, 305-306, 318
- Recombinación**
 no radiante, 740, 760
 radiante, 740, 760
- Recristalización, 310-313, 319**
 etapa de recocido de, 308-313, 319
 tamaño de grano recristalizado, 312-313
 temperatura, 310-312, 319
- Recubrimientos**
 cerámica, 594
 corrosión y, 869-870
 de barrera térmicos (RBT), 157-158, 189
 de fibra óptica, 158
- Recuperación elástica, 296-297**
- Redes, 55, 60-69, 102-104**
 Bravais, 60-62, 102
 celdas unitarias y, 60, 62-69, 104
 estructura cristalina y, 55, 60-69, 102
 hexagonales, 69
 interpenetrantes de polímeros, 637, 644
 número de, 65-67
 número de coordinación, 69
 parámetros, 63-65, 103
 puntos, 60-62, 103
 radio atómico vs. parámetro, 68
- Reflectividad (R), 806, 825**
- Reflexión, materiales fotónicos, 800-801, 806, 803, 825**
- Refracción, materiales fotónicos, 800-806, 825**
- Refractarios, 591-593, 597**
 ácidos, 592
 básicos, 593
 neutros, 593
- Regla de**
 Chvorinov, 338-339, 363
 la palanca, 393-395, 404
 Matthiessen, 731, 760
 mezclas, 655-656, 661, 685, 690
- Regla de fases de Gibbs, 376-379, 390-391, 404, 419-420**
 reacciones de dos fases, 390-391
 reacciones de tres fases, 419-420
 relación de fase a componente, 376-379, 404
- Reglas de Hume-Rothery, 382-384, 404**
- Relación de**
 agua-cemento, 708
 Arrhenius, 159, 453
 Avrami, 453, 482
 deformación plástica (r), 296
 Pilling-Bedworth (P-B), 876-877, 883
 Poisson (ν), 213, 238
 resistencia a peso, 9, 16, 19, 539-540
- Relaciones de energía interfacial, 457, 482**
- Relajación de esfuerzo, 200, 238, 627-628, 645**
- Remanencia (M_r), 778, 794**
- Resistencia (R), 720**
 a la flexión (módulo de ruptura), 218-221, 237
 a la fluencia compensada, 208-237
 a la tensión, 209-211, 238, 661-663
 a la tensión extrema, 209, 238
 específica, 539-540, 564, 668-669, 690, 703
Véase Prueba a la tensión; Resistencia a la fluencia
- Resonancia magnética nuclear (RMN), 769**
- Revenido, 269, 275, 281, 305-306, 319, 477, 478, 483, 510-511**
 elementos de aleación, efectos de, en, 510-511
 embutido profundo, 293
 en la fase austenítica, 500, 530
 esfuerzos residuales y, 305-306, 319
 falla de material y, 269, 275, 281
 martensita en acero, 477-478, 483
- Revenimiento, 708, 715**
- Revestimiento, 671, 690**
- Rigidez, 211-213, 238**
- Ruptura en caliente, 401, 404**
- S**
- Secado por aspersión, 575, 597**
- Secuencias de apilamiento, 82-83**
- Segregación, 399, 401-402, 405**
 central (segregación interdendrítica), 401, 404
 interdendrítica (segregación central), 401-404
- Segunda etapa de grafitización (PEG), 527, 531**
- Semiconductores, 7-10, 19, 32, 51, 157, 157, 720, 722-723, 727-728, 733-743, 760-761, 842**
 aplicaciones de, 7, 9-10, 741-743
 brecha de banda directa, 740
 brecha de banda indirecta, 740
 combinaciones de elementos II-VI y III-V, 32-51
 conductividad de, 722-723
 conductividad térmica de, 842
 difusión y, 157
 dopantes, 157, 720, 737-739, 759
 elementos, 32, 51
- estructura de banda de, 727-728**
 extrínsecos, 733, 736, 760
 intrínsecos, 733, 760
 neutralidad de carga, 737-739
 propiedades materiales de, 7-10, 19, 733-736
 termistores, 742-743
 tipo n , 737
 tipo p , 737
 transistores, 742-743
 transistores de efecto de campo (TEC), 743
 transistores de unión bipolar (TUB), 742-743
- Sensibilidad**
 a la muesca, 229, 237, 269
 a rapidez de deformación (m), 295-296, 319
- Sensibilización, 871, 883**
- Sensor gigante de magnetorresistencia (SGM), 783**
- Serie**
 de fuerzas electromotrices (fem), 857-858, 882
 galvánica, 862-863, 882
- Servicio a alta temperatura, 314**
- Sílice fundido, 583**
- Sin equilibrio, 399-402, 461-462, 438**
 precipitados, 461-462
 solidificación, 399-402, 438
- Sinterización, 136, 146, 183-185, 189, 575, 577-579, 597**
 características de materiales cerámicos, 580-592
 de fase líquida, 184, 189
 defectos en superficie y, 136, 146
 difusión y, 183-185, 189
 metalurgia de polvos, 183-185, 189
 polvos cerámicos, 575, 577-579, 597
 prensado en caliente, 184-185, 189, 577-579, 597
 prensado isostático en caliente (PIC), 185, 189, 577-579, 597
- Síntesis y procesamiento de polvos cerámicos, 575-580**
- Sistemas**
 eficientes de vulcanización (EF), 632
 microelectromecánicos (SMEM), 24
 poliméricos, solubilidad y, 382
- Sitios**
 intersticiales, 84-86, 103
 intersticiales cúbicos, 84-85
 intersticiales octaédricos, 84-86, 117-118
- Sodio, estructura de banda de, 726-727**
- Soldabilidad de aceros, 518-519**
- Soldadura, 314-315, 360-361**
 blanda, 360, 365
 fuerte, 360, 363, 686
 por fusión, 360-361, 363

Solidificación, 328-373, 397-402, 404-405.

Véase también Proceso de solidificación rápida

aleaciones, 401-402, 404-405
 constante de molde, 338-339, 364
 crecimiento de monocristales, 357-359, 365
 crecimiento epitaxial, 357, 359, 363
 curvas de enfriamiento, 343-344
 defectos por, 346-351
 direccional (SD), 357-358, 363
 efecto en estructura y propiedades, 340-343
 endurecimiento por solución sólida y, 397-402, 404-405
 espaciado entre brazos dendríticos
 formación de núcleos, 330-335
 frente, 337, 365
 fundición, 338-359
 importancia tecnológica de, 330
 materiales cristalinos, 329
 mecanismos de crecimiento, 336-338, 363
 polímeros, 359-360
 procesos de unión y, 360-361
 regla de Chvorinov, 338-339, 363
 secundarios (EBDS), 340-343, 365
 segregación y, 399, 401-402, 405
 sin equilibrio, 399-402, 404-405
 solidificación direccional (SD), 357-358, 363
 tiempo, 338-343
 uso de procesamiento primario, 330, 364
 uso de procesamiento secundario, 330, 355, 364
 vidrios inorgánicos, 359-360
 Sólidos, estructura de banda de, 725-728
 temperatura en solidus, 387-388, 405, 420-423, 456-458
 Solubilidad, 380-384, 420-423, 456-458
 aleaciones endurecidas al exceder su límite, 420-423, 456-458
 copolímeros y, 382, 404
 ilimitada, 380-384, 405
 limitada, 380-382, 404
 reacciones eutécticas, 420-423
 reacciones eutectoides, 456-458
 reglas de Hume-Rothery para, 382-384, 404
 sistemas poliméricos y, 382
 soluciones sólidas y, 380-384, 405
 Soluciones sólidas, 374-411, 416, 442, 466, 482-483
 austenita, 466, 482
 diagramas de fases para, 376-379, 387-397, 404-405
 endurecimiento por dispersión, 385, 404, 416, 422, 482-483
 equilibrio de fases y, 374-411
 ferrita, 466, 482
 intermedias, 416, 442

reacciones eutécticas, 416, 442
 reacciones eutectoides, 466, 483
 regla de fases de Gibbs para, 376-379, 390-391, 404
 sobresaturadas, 460, 483
 solidificación sin equilibrio, 399-402
 solubilidad y, 380-384, 405
 Subenfriamiento (ΔT), 332-333, 365
 Sublimación, 378
 Superalesaciones, 553, 555, 564
 Supercalor, 332, 365
 Superconductores, 720, 722-723, 761
 Superparamagnetismo, 758, 775, 794
 Susceptibilidad magnética (X_m), 772, 794

T

Tabla periódica de elementos, 32-34, 51
 Tacticidad en polímeros, 616-617, 645
 Tamaño de grano, 142-143, 146, 335, 363-364, 580-581
 cerámica sinterizada, 580-581
 endurecimiento, 142-143, 146, 335, 363-364
 formación de núcleos (nucleación), 335, 363-364
 imperfecciones superficiales y, 142-143, 146
 inoculantes, 335, 364
 límites de granos y, 142-143, 146
 refinamiento (inoculación), 335, 363-364
 Técnica de
 crecimiento de Czochralski, 744-746
 prensado en caliente, 184-185, 189, 401, 404, 577-579, 596
 prensado isostático en caliente (PIC), 185, 189, 401-402, 404, 577-579, 596, 596
 Técnicas de difracción, 58, 96-100, 102-104
 análisis de estructura cristalina, 58, 96-100, 102-104
 difractómetro, 96, 98
 electrón, 58, 99-100, 103
 ley de Bragg, 96-97, 102
 método de Laue, 96-97
 microscopio electrónico de transmisión (MET), 99-100, 104
 Temperatura, 13-15, 168-173, 188, 205, 215-216, 237, 274, 310-312, 319, 332-333, 365, 343-344, 387-388, 404, 453-455, 460, 462-465, 470-471, 582-583, 585-585, 619-624, 629, 729-731, 757, 759, 774, 779, 793
 conductividad, efectos en, 729-731
 Curie (T_C), 757, 759, 774, 779, 793
 curvas de enfriamiento para solidificación, 343-344
 deflexión, 629, 644
 degradación (de descomposición), 619-620, 644
 diagramas de fases y, 387-388, 404

difusividad (D) y, 168-173, 188
 distorsión, 629, 644
 efectos en materiales, 13-15
 endurecimiento por envejecimiento, efectos en, 460, 462-465
 envejecimiento, 460
 escala de recocido, 585-586
 escala de trabajo, 585-586
 grado líquido, 585-586
 intervalo de solidificación, 388, 404
 liquidus, 387-388, 404
 propiedades mecánicas y, 205, 215-216, 237, 274
 prueba de fatiga, efectos en, 274
 rapidez de enfriamiento de eutectoides, 470-471
 recalcencia, 344, 364
 recristalización, 310-312, 319
 solidus, 387-388, 405
 subenfriamiento (ΔT), 332-333, 365
 termoplástica, efectos en, 619-624
 transformaciones de fase de estado sólido, efectos en, 453-455
 transición de dúctil a quebradizo (TTDQ), 228-230, 236
 variaciones de viscosidad para procesamiento vítreo, 585-586
 Temperatura transición en vidrio (T_g), 205, 237, 582-583, 621-623
 prueba a la tensión y, 205, 237
 termoplásticos, 621-623
 vidrios inorgánicos, 582-583
 Templabilidad, 509, 511-514
 aceros, 509, 511-514
 curvas, 511-512, 530
 distancia de Jominy, 511-514, 530
 elementos para aleación y, 509
 pico secundario, 514, 531
 Templado, 459-460
 Tenacidad, 213-214, 227-228, 237-238, 248-250, 281
 a la tensión, 213-214, 228, 238
 fractura (K_{IC}), 228, 237, 248-250
 impacto y, 227-228, 237-238
 Tereftalato de polietileno (PET), 157
 Termistores, 742-743, 761
 Termoestables, 9-10, 19, 602-604, 635-637, 645
 aminos, 637
 epóxicos, 637
 estructura molecular de, 602-603
 fenólicos, 636-637
 interpenetración en redes de polímeros, 637, 644
 poliésteres, 637
 poliimidas, 637
 polimerización de, 9-10, 19
 unidades funcionales y aplicaciones de, 635-636
 uretanos, 637

- Termoformado, 639-641
- Termoplásticos, 9-10, 19, 298-299, 319, 602-603, 612-630, 645
- coloreado, 630, 644
- complejos, 613-614
- comportamiento al impacto, 629
- comportamiento elástico, 625
- comportamiento plástico, 625-626
- comportamiento viscoelástico, 624-625, 645
- copolímeros, 617-618, 644
- cristalinidad en, 616, 622-624, 629
- deformación de, 616, 629
- efectos de la temperatura en, 619-624
- endurecimiento por deformación, 298-299, 319
- estado achucado de, 620
- estado semejante al caucho de, 620
- estructura molecular de, 602-603
- estructuras complejas de, 613-614
- grado de polimerización, 615
- grupos laterales, efectos de, 615-616
- mezcla y aleación, 617
- microcavidades, 629-630, 644
- polimerización de, 9-10, 19
- polímeros cristalinos líquidos (LCP), 617-618, 644
- propiedades de, 612
- propiedades mecánicas de, 624-630
- relaciones de propiedad de una estructura en, 615-619
- relajación de esfuerzo, 627-628, 645
- tacticidad en, 616-617, 645
- temperatura de degradación (descomposición), 619-620, 644
- temperatura de transición vítrea (T_g), 621-623
- termofluencia, 627-629, 645
- unidades de repetición, 613-614
- Textura, 301-304, 319
- comportamiento anisotrópico y, 301-303
- endurecimiento, 302, 303, 319
- fibra, 301, 318
- lámina, 302, 318
- películas delgadas, desarrollo en, 303-304
- Tiempo, 173-175, 277-278, 280-281, 338-343, 462-463
- difusión, efectos en, 173-175
- endurecimiento por envejecimiento (precipitación), efectos en, 462-463
- procesos de fundición, 338-343
- rapidez de termofluencia, 277-278, 280
- relajación (τ), materiales fosforescentes, 820, 825
- ruptura, 277-278, 281
- solidificación, 338-343
- solidificación local, 344, 364
- solidificación total, 344, 365
- Titanato de circonio de plomo (PZT), 25, 595
- Trabajo de fractura, 213, 239
- Trabajo en caliente, 315-318. *Véase también*
- Tratamientos térmicos
- acabado de superficies, 316-317
- comportamiento anisotrópico, 316
- falta de endurecimiento, 315-316
- precisión dimensional por, 316
- Trabajo en frío, 209-306, 308-314, 318-319.
- características de, 306-308
- Véase también* comportamiento anisotrópico por, 301-303
- efecto Bauschinger, 297, 318
- endurecimiento por deformación
- esfuerzos residuales por, 304-305, 319
- exponente de endurecimiento por deformación (n), 293-295, 319
- microestructuras de materiales de, 301-306
- porcentaje de trabajo en frío (%TF), 299-301
- procesamiento de deformación y, 293-294, 318
- recocido y, 308-314, 319
- recristalización, 310-313, 319
- recuperación elástica, 296-297
- recuperación, 309-310, 319
- relaciones en la curva de esfuerzo-deformación, 292-297
- sensibilidad de rapidez de deformación (m), 295-296, 319
- Trabajo en tibio, 312, 319
- Transangular, 254-255, 281
- Transformaciones
- alotrópicas, 72-73, 102
- atéricas (displacivas), 475, 482
- de fase. *Véase* Transformaciones de fase de estado sólido
- polimórficas, 72-73, 103
- Transformaciones de fase de estado sólido, 335, 365, 452-455
- cinética (rapidez) de crecimiento y formación de núcleos en, 452-453
- crecimiento en, 452-455
- efectos de la temperatura en, 453-455
- endurecimiento por dispersión, 452-455
- formación de núcleos en, 335, 365, 452-455
- relación de Avrami, 453, 482
- Transistores, 742-743
- de efecto de campo (TEC), 743, 783
- de unión bipolar (TUB), 742-743
- Transmisión, materiales fotónicos, 800-801, 808-811, 813
- Tratamiento
- por solución, endurecimiento por envejecimiento, 459, 483
- térmico de homogeneización, 401, 404
- Tratamientos de superficie, 156-157, 178-179, 188, 316-317, 516-518, 530-531
- acabado, 316-317
- carbonitruración, 516, 530
- carburación, 156-157, 178-179, 188, 516-517, 530-531
- cianuración, 516, 530
- difusión y, 156-157, 178-179, 188
- nitruración y, 516-517, 531
- profundidad de cementado para, 516, 530
- tratamientos superficiales del acero, 516-517, 530-531
- tratamientos térmicos al acero, 516-518
- Tratamientos térmicos, 269, 275, 281, 293-294, 305-306, 314-315, 318, 360-361, 458-465, 482-483, 492-537
- aceros, 493-519, 529-531
- aceros inoxidables, 519-522, 529-531
- austenitización, 498, 530
- diagramas de tiempo-temperatura-transformación (TTT) para, 501-503, 510
- diagramas para transformación de enfriamiento continuo (TEC), 507-508
- endurecimiento por envejecimiento (precipitación), 458-465, 482-483
- esferoidización, 499-500, 531
- hierros fundidos, 523-531
- normalización, 498-488, 531
- recocido, 498-499, 500-501, 524, 529
- recocido de proceso, 498, 531
- revenido, 527, 530
- soldadura, 314-315, 360-361, 464-465
- tratamientos de superficies, 515-518
- zona afectada por el calor (ZAC), 314-315, 318, 464-465
- zona de fusión, 360-361, 363
- Tratamientos térmicos isotérmicos, 500-503, 530
- cambios de concentración de carbono en acero, 501-503
- diagramas de tiempo-temperatura-transformación (TTT) para, 501-503, 510
- interrupción de la transformación, 503
- recocido, 500-503, 530
- revenido en la fase austenítica, 500, 530
- Tratamientos térmicos templado y revenido, 269, 275, 281, 305-306, 319, 504-508, 531
- austenita retenida, 505, 531
- diagramas para transformación de enfriamiento continuo (TEC), 507-508
- esfuerzos residuales y, 505-506
- grietas por temple por, 505-506, 531
- rapidez de templado para, 506-507
- Trayectoria libre media (λ_e) de electrones, 729, 760
- Trefilado, proceso de estirado de alambre, 293-294, 318
- Tubérculos, 867, 883

U

Unidad de masa atómica (uma), 27, 50
 Unidades, 207-208, 720, 723, 770-771
 materiales electrónicos, 720, 723
 materiales magnéticos, 770-771
 resultados de prueba a la tensión, 207-208
 Unidades de repetición, 62-63, 606, 613-614, 632-633, 645
 celdas unitarias, 62-63
 elastómeros, 632-633
 polimerización y, 606, 645
 termoplásticos, 613-614
 Unión
 adhesiva, 685
 cerámica, 591, 596
 Uniones
 no saturadas, 606, 645
 p-n, 741, 760
 Uretanos, 637

V

Vacancias (vacantes), 114, 115-117, 147
 Vacio, permeabilidad magnética de, 770-771
 Valencia de un átomo, 31, 51
 Valor de deformación compensado, 208, 237
 Variaciones de viscosidad para procesamiento de vidrio, 585-586
 Vectores de Burgers (*b*), 122-128, 145
 Velocidad de desplazamiento, 721, 759
 Vidriados, 572, 596
 Vidrio
 de seguridad laminado, 306, 318, 588, 597

 de sílice (SiO_2), 25-26, 57, 94-95
 fotocrómico, 336, 364
 Vidrios, 7-9, 18, 58-60, 103, 258-260, 280, 305-306, 318-319, 335-336, 359-360, 364, 359-360, 582-588, 596-597, 813
 aplicaciones de, 7, 9
 colores en, 813
 composiciones, 587-588
 cristalización de, 59-60, 103
 devitrificación, 585, 596
 diseño de, 584-585
 distribución atómica de, 58-60
 expansión ultrabaja (ULE), 43
 fotocrómico, 336, 364
 fractura conoidal de, 258, 280
 fractura en, 258-260, 280
 grados de viscosidad para procesamiento, 585-586
 inorgánicos, 359-360, 582-588, 596
 materiales amorfos, como, 58-60, 103
 nucleación (formación de núcleos) de, 335-336
 óxidos en silicato, 583-584, 596-597
 parisón, 585, 597
 preforma usada para, 359-360, 364
 procesamiento de solidificación rápida, 59, 103, 335, 364
 procesos de producción, 582-588, 596
 propiedades materiales de, 7-9, 18
 recocidos, 305-306, 318
 seguridad laminado, 306, 318, 588, 597
 silicato, 583-588
 silicato modificado, 583-588

 solidificación de, 335, 336, 359-360
 templados, 304-305, 319, 477-478, 483, 510-511, 587-588, 597
 Vidrios-cerámicos, 9, 18, 59, 103, 336, 363, 588-590, 596
 cristalización de, 59, 103
 nucleación (formación de núcleos) de, 336, 363, 589
 procesos de producción, 588-590, 596
 propiedades materiales de, 9, 18
 Vidrios metálicos, 59-60, 103, 231-233
 configuración atómica amorfa de, 59-60, 103
 propiedades mecánicas de, 231-233
 solidificación rápida de, 138, 146
 voluminosos, 231-233
 Viscosidad (η), 202-203, 238
 aparente (η_{ap}), 202, 237
 cinemática (ν), 202, 237
 Vitricación, 590, 597
 Voltaje aplicado, 871, 882
 Vulcanización, 631-632, 645

Z

Zirconia estabilizada con itria (YSZ), 157
 Zona
 afectada por el calor (ZAC), 314-315, 318, 464-465
 columnar, 344-348, 363
 de enfriamiento, 344, 363
 de fusión, 360-361, 363
 de miscibilidad metaestable, 419, 442
 de miscibilidad, 419, 442
 equiaxial, 346, 363

■ Unidades y factores de conversión

1 libra (lb) = 4.448 newtons (N)
1 psi = libras por pulgada cuadrada
1 MPa = MegaPascal = MegaNewtons por metro cuadrado (MN/m²)
= Newtons por milímetro cuadrado (N/mm²) = 1 000 000 Pa
1 GPa = 1 000 MPa = GigaPascal
1 ksi = 1 000 psi = 6.895 MPa
1 psi = 0.006895 MPa
1 MPa = 0.145 ksi = 145 psi

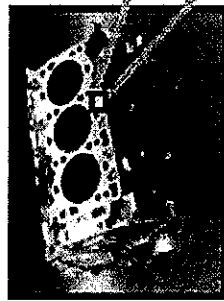
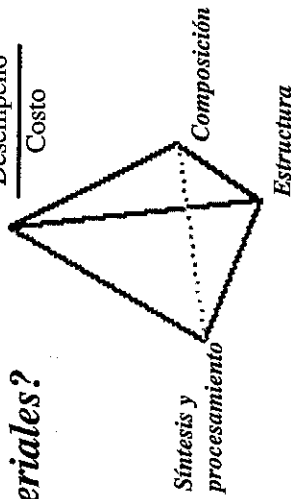
■ Algunas relaciones, constantes y unidades útiles

Electrón volt = 1 eV = 1.6×10^{-19} joules = 1.6×10^{-12} ergs
1 amp = 1 coulomb/segundo
1 volt = 1 amp · ohm
 k_B a temperatura ambiente (300 K) = 0.0259 eV
 c = velocidad de la luz = 2.998×10^8 m/s
 ϵ_0 = permitividad del espacio libre = 8.85×10^{-12} F/m
 q = carga del electrón = 1.6×10^{-19} C
Constante de Avogadro N_A = 6.022×10^{23}
 k_B = constante de Boltzmann = 8.63×10^{-5} eV/K = 1.38×10^{-23} J/K
 h = constante de Planck = 6.63×10^{-34} J-s = 4.14×10^{-15} eV-s



¿Qué es la ciencia e ingeniería de materiales?

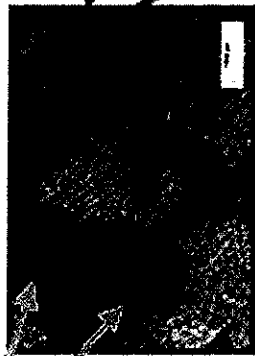
Desempeño
Costo



Estructura a macroescala
Bloque de motor
≅ hasta 1 metro

Criterios de desempeño

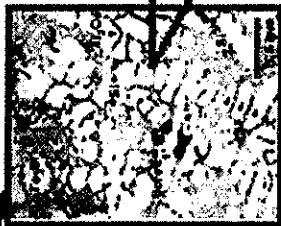
- Energía generada
- Eficiencia
- Durabilidad
- Costo



Estructura a microescala
≅ 1-10 milímetros

Propiedades afectadas

- Fatiga de ciclo alto
- Ductilidad



Estructura a nanoescala
≅ 1-100 micrómetros

Propiedades afectadas

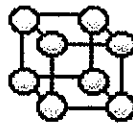
- Resistencia a la fluencia
- Resistencia a la tensión última
- Fatiga de ciclo alto
- Fatiga de ciclo bajo
- Creepimiento térmico
- Ductilidad



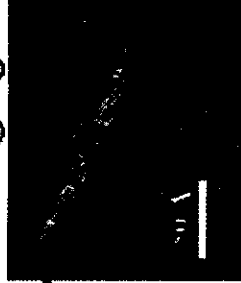
Estructura a escala atómica
≅ 1-100 nanómetros

Propiedades afectadas

- Resistencia a la fluencia
- Resistencia a la tensión última
- Fatiga de ciclo bajo
- Ductilidad



Celda unitaria



Estructura a escala atómica
≅ 1-100 ángstroms

Propiedades afectadas

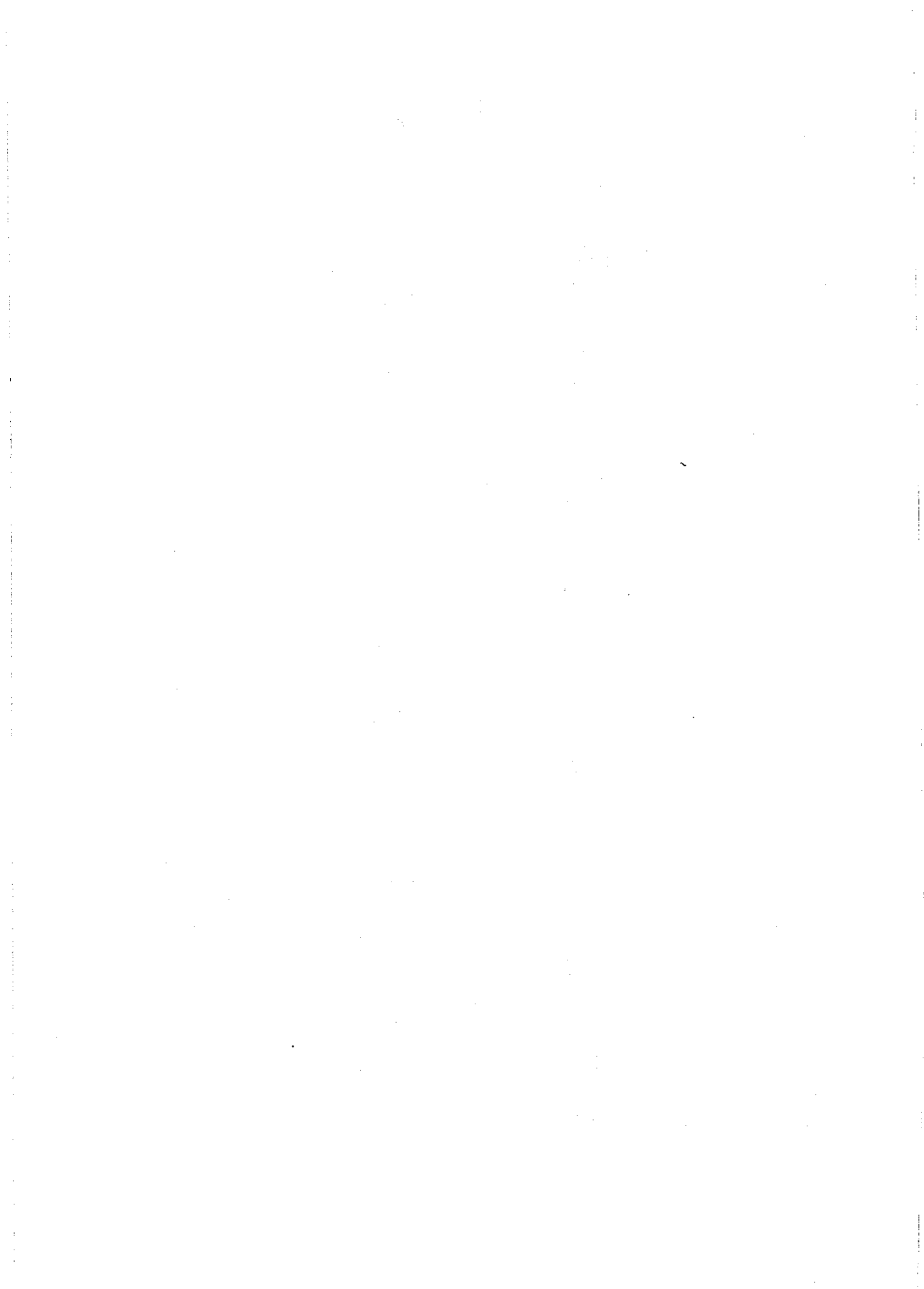
- Módulo de Young
- Creepimiento térmico

Se muestran tres escalas de longitud, que resultan de la combinación de la ciencia y la ingeniería de materiales. Se muestran las estructuras a escala atómica, nano, micro y macro de la aleación de aluminio fundido (para bloques de motor) en relación con las propiedades afectadas y el desempeño. El tetraedro de la ciencia e ingeniería de materiales (CIM) que representa esta aproximación se muestra en la esquina superior derecha.

(Ilustraciones por cortesía de John Allison y William Donlon, Ford Motor Company.)

[illegible]

6	Lantánidos
7	Actínidos



This image shows a single sheet of white paper with horizontal blue or grey ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

This image shows a single sheet of white paper with horizontal blue or grey ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There is no handwriting or printed text on the paper. A small, dark smudge or mark is visible near the top center of the page.